



Geschäftszielorientierte, Toolgestützte, Szenariobasierte Risikoaggregation bei der SAP

Diplomarbeit am Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren
(AIFB)

Prof. Dr. D. Seese
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften
Universität Karlsruhe (TH)

von

Cand. Inform. Wirt
Friedrich Köster

Betreuer:

Prof. Dr. D. Seese
M. Collet, SAP AG
Dr. D. Metzger, SAP AG

Tag der Anmeldung: 1. September 2005
Tag der Abgabe: 28. Februar 2006

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Karlsruhe, den 28. Februar 2006

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Grundlagen	2
2.1	Risikobegriff	2
2.2	Risikomanagement-Zielsetzungen	2
2.3	Rechtliche Anforderungen	4
2.3.1	AktG/KonTraG/TransPuG	4
2.3.2	Deutscher Corporate Governance Kodex	5
2.4	Regulatorische und Prüfungs-Anforderungen	5
2.4.1	IDW-Standard	5
2.5	Risikomanagement in der betrieblichen Praxis	6
2.5.1	Risikomanagement in Projekten	6
2.5.2	Strategisches und operatives Risikomanagement	7
2.6	Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen	8
2.6.1	Wahrscheinlichkeitstheoretisches Modell	8
2.6.1.1	Sigma-Algebra	8
2.6.2	Wahrscheinlichkeitsraum	9
2.6.3	Zufallsvariablen	9
2.6.3.1	Verteilungsfunktion	9
2.6.3.2	Diskrete Zufallsvariablen	9
2.6.3.3	Stetige Zufallsvariablen	10
2.6.3.4	Zusammenhang von Verteilungs- und Dichtefunktion	10
2.6.3.5	Gemischte diskrete und stetige Verteilung	10
2.6.4	Zentrale Momente von Verteilungen	11
2.6.4.1	Erwartungswert	11
2.6.4.2	Varianz	11

2.6.4.3	Schiefe	12
2.6.4.4	Kurtosis	12
2.6.5	Quantil	13
2.6.6	Multivariate Zufallsvariablen	13
2.6.6.1	Gemeinsame Verteilung	13
2.6.6.2	Randverteilung	14
2.6.6.3	Korrelation	15
2.6.6.4	Elliptische Verteilungen	18
2.6.6.5	Copulafunktionen	19
2.6.7	Bedingte Wahrscheinlichkeit	21
2.6.7.1	Totale Wahrscheinlichkeit	21
2.6.7.2	Satz von Bayes	22
2.6.7.3	Bedingter Erwartungswert	22
3	Beschreibung von Risiken und Zielen	23
3.1	Qualitatives und halbquantitatives Risikomanagement	23
3.1.1	Aufteilung in Condition, Consequence, Indicator und Response	23
3.1.2	Wahrscheinlichkeit und Schweregrad als halbquantitative Punktschätzung	26
3.1.3	Annahme einer Nutzenfunktion	27
3.1.4	Aggregation halbquantitativer Werte	27
3.1.5	Response Cost	28
3.1.6	Timeframe	28
3.1.7	Weitere zeitliche Bezüge der halbquantitativen Methode	28
3.2	Quantitatives Risikomanagement	29
3.3	Zielorientierung	30
3.3.1	Hierarchische Zieldefinition	30
3.3.2	Der Zielplanungsprozess der SAP	30
3.3.3	Arten von Zielvorgaben	30
3.3.4	Integration von Zielen in den Risikomanagementprozess	31
3.3.5	Quantifizierung der Ziele	31
3.4	Künftige Zielsetzung des Risikomanagements	32

4	Methoden der Aggregation	33
4.1	Klassifizierung der Risiken	34
4.1.1	Klassifizierung nach der Organisationsstruktur	34
4.1.1.1	Bereichsübergreifendes Denken	35
4.1.2	Klassifizierung nach Risikokategorien	36
4.1.2.1	Die „Common Risks“ der SAP AG	37
4.2	Risikomaße	37
4.2.1	Erwarteter Verlust als Risikomaß	38
4.2.1.1	Wünschenswerte Eigenschaften des erwarteten Verlusts	38
4.2.1.2	Einschränkungen	38
4.2.1.3	Veranschaulichung von Varianz und erwartetem Verlust	39
4.2.2	Value-at-Risk als Risikomaß	40
4.2.2.1	Festlegung der Haltedauer	41
4.2.2.2	Festlegung des Konfidenzniveaus	42
4.2.3	Exkurs: Basel II und unerwartete Verluste	42
4.3	Analytische Aggregation und Simulation	44
4.3.1	Varianz-Kovarianz-Modell	44
4.3.2	Monte Carlo Simulation	45
4.3.2.1	Generieren von Zufallszahlen	46
4.3.2.2	Nicht gleichverteilte Zufallszahlen	47
4.3.2.3	Generieren von korrelierten Zufallszahlen	48
4.3.2.4	Fazit zur Monte Carlo Simulation	51
5	Methoden der Quantifizierung	52
5.1	Schätzung von Verlusthöhen-Verteilungen	53
5.1.1	Drei-Punkt-Schätzung	53
5.1.2	Wahl von parametrischen Verteilungen und Schätzung der Parameter	55
5.2	Einheitliche Risikodefinition	56
5.3	Sammlung historischer Verlustdaten	56
5.3.1	Schwierigkeiten bei der Verwendung historischer Verlustdaten . .	57
5.3.2	Datenstruktur von Verlustdaten	57
5.3.3	Quantifizierung von Verlusten	58
5.4	Der Weg zu einem integrierten Chancen- und Risikomanagement	59

5.4.1	Einbeziehen weiterer Informationsquellen	61
5.5	Behandlung von Risikoketten und Korrelationen	61
5.5.1	Aufsummieren des Value at Risk	61
5.5.2	Verwendung einer Korrelationsmatrix	62
5.5.3	Würdigung der Korrelationsmethode	63
5.5.4	Verwendung von Copulas zur Modellierung von Abhängigkeiten	64
5.5.4.1	Kritische Würdigung von Copulas und Korrelationsmatrizen	64
5.5.5	Kausalität im Risikomanagement	65
5.5.6	Bayes-Netzwerke	66
5.5.6.1	Entwicklung eines einfachen Beispielnetzes	67
5.5.6.2	Unterschiede zum Korrelationsmodell	67
5.5.6.3	Grenzen von Bayes-Netzwerken	69
5.5.6.4	Integration von Bayes-Netzwerk und Simulation	71
5.5.6.5	Bewertung: Bayes-Netzwerke für die Modellierung des Eintritts	71
5.5.6.6	Einbeziehen von Verlusthöhen	72
5.5.6.7	Fazit	75
5.6	Szenarioanalysen	75
5.6.1	Szenarioanalyse in Bayes-Netzwerken	75
5.6.2	Sensitivitätsanalysen	76
5.6.3	Bayes-Netzwerk als Entscheidungsgraph	78
5.7	Validierung/Backtesting des Modells	81
5.7.1	Maßnahmen zur Steigerung der Modellvalidität	82
6	Weiterentwicklung des Risikomanagements der SAP	84
6.1	Vergleich mit Praxis und Tools anderer Konzerne in Deutschland	84
6.1.1	Schering	84
6.1.2	Deutsche Telekom	85
6.1.3	Vattenfall Europe	85
6.1.4	Allgemeine „Best Practice“	86
6.2	Risikomanagement-Framework der SAP und Anwendung ORM	86
6.2.1	Situation bei der SAP	86
6.2.2	Sicherheitsaspekte in der Risikomodellierung	88

6.2.3	Weiterentwicklung des Datenmodells	89
6.2.3.1	Beziehung von Zielen zu Einzelrisiken	91
6.2.3.2	Zielhierarchie	91
6.2.3.3	„Aggregat“-Entität	92
6.2.3.4	„Ziel“-Entität	93
6.2.3.5	Empfehlungen für einen stufenweisen Ausbau der Anwendung ORM	94
6.3	Strategisches Risikomanagement als Fortführung des Managements von Betriebsrisiken?	96
6.3.1	Einbettung in die Organisation	97
7	Fazit	98
7.1	Zusammenfassung	98
7.2	Ausblick	99
	Schlagwortverzeichnis	104

Abbildungsverzeichnis

2.1	Stetige Dichtefunktion, Histogramm und Mischform	10
2.2	Standardnormalverteilung, leptokurtische und rechtsschiefe Dichtefunktion	12
2.3	Verteilungs- und Dichtefunktion mit Quantil	14
2.4	Multivariate Standardnormalverteilung mit Randdichten	15
2.5	Normalverteilungen mit unterschiedlicher Korrelation	17
2.6	Bestimmung der Spearman'schen Rangkorrelation	18
2.7	Graph der unteren und oberen Fréchet-Hoeffding-Grenze	20
2.8	Konturplots der Fréchet-Hoeffding-Grenzen	20
2.9	Die Produktcopula $\Pi(u, v) = uv$	20
3.1	Risikomanagement-Prozesse im schematischen Vergleich	24
3.2	Der Riskit Analysegraph nach Kontio	24
4.1	Binomialverteilung mit unterschiedlichen Parametern	40
4.2	Aggregationschema für eine verteilungsbasierte Bestimmung des Gesamt- risikos	44
4.3	Spektraltest in zwei Dimensionen	46
4.4	Untersuchung von 2000 Zufallszahlen des RANDU-Generators	47
4.5	Transformation gleichverteilter Zufallszahlen in standardnormalverteilte Zufallszahlen	48
5.1	Gesamtverlustverteilung als Ergebnis der Aggregation von 7 symmetri- schen Dreiecksverteilungen	54
5.2	Negative Beeinflussung des Ziels durch Risiko, positive durch Chancen .	60
5.3	Einfaches Beispiel für unzulässige Korrelation	63
5.4	A-posteriori-Verteilung der Beispielerisiken Blitz, Feuer, Wasserschaden .	68
5.5	Aktualisierte Wahrscheinlichkeiten bei 10 % Blitzschlaggefahr	69
5.6	Beispielverteilung	70

5.7	Vorwärtsabasten der Zustände	72
5.8	Integration von Ereignissen mit bedingten Wahrscheinlichkeiten und beliebig verteilten Verlusthöhen in einem Modell	73
5.9	Verteilungsfunktion dreier Risiken, die durch bedingte Wahrscheinlichkeiten und Dreiecksverteilungen beschrieben sind	74
5.10	Rückwärtsrechnung von Wirkung zu Ursache	76
5.11	Wahrscheinlichkeiten und Kosten ohne Installation einer Sprinkleranlage	80
5.12	Wahrscheinlichkeiten und Kosten nach der Entscheidung für eine Sprinkleranlage	81
6.1	Doppelte Zuordnung von Risiko R_3	90
6.2	Beispiel: Beziehung von Zielen untereinander	92

Tabellenverzeichnis

3.1	Globale Impactklassen der SAP	26
3.2	Wahrscheinlichkeitsklassen der SAP	26
3.3	P×I-Matrix der SAP mit Risikoniveaus Low, Medium und High	27
4.1	Auf die SAP angepasste „Risikomatrix“	34
4.2	Hauptkategorien der „Common Risks“	37
5.1	Sieben durch Dreiecksverteilungen beschriebene Einzelrisiken	54
5.2	Mögliche Risikobeschreibungen in einem integrierten Chancen- und Risikomanagement	60
5.3	Wahrscheinlichkeiten für Blitz (unbedingt) und Feuer/Wasser (bedingt)	68
5.4	Bedingt Wahrscheinlichkeiten ohne Sprinkleranlage	79
5.5	Reduktion der Feuerwahrscheinlichkeit um 66 % durch eine Sprinkleranlage	80
5.6	Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Wasserschadens durch eine Sprinkleranlage	80
6.1	Ausgewählte Ergebnisse der KPMG-Studie „Risikomanagement in deutschen Unternehmen“ [KPM03]	87

1. Einführung

Risikomanagement von Betriebsrisiken gewinnt weltweit aufgrund gesteigener Anforderungen von Gesetzgebern und Kapitalmärkten an Bedeutung. Gutes Risikomanagement erfüllt nicht nur die Pflicht, sondern trägt mit seinen unternehmensweit gesammelten Informationen zu einer verbesserten Unternehmensplanung bei. Dazu müssen diese einheitlich beschrieben, strukturiert und analysiert werden.

In der vorliegenden Arbeit werden die Voraussetzungen und Methoden für eine unternehmensweite Risikoaggregation beschrieben. Es wird grundsätzlich ein „Bottom-Up“-Ansatz verfolgt, bei dem es darum geht, die Bewertung und Analyse des bestehenden Risikoinventars zu verbessern. Ziel dieser Arbeit ist es, Verbesserungsmöglichkeiten für die quantitative Beschreibung von Risiken und betroffenen Geschäftszielen sowie ihrer Zusammenhänge aufzuzeigen. Bei der Beschreibung der Methoden wird auf den derzeitigen Umsetzungsstand bei der SAP Bezug genommen.

In Kapitel 2 werden grundlegende Begriffe des Risikomanagements und der Wahrscheinlichkeitstheorie erläutert und die gesetzlichen Grundlagen für Risikomanagement und -aggregation genannt. Eine Einführung in die „best practice“ des Risikomanagements in Projekten greift einigen Verfahren vor, die nachfolgend noch ausführlicher beschrieben werden. In Kapitel 3 werden Möglichkeiten für die qualitative, halbquantitative und quantitative Beschreibung von Risiken und Zielen und deren Implikationen für eine Risikoaggregation gegenübergestellt. Deren Elemente – das Klassifizieren, Messen und Zusammenrechnen mehrerer Risiken – werden in Kapitel 4 beleuchtet. Kapitel 5 erläutert, wie Risiken stochastisch beschrieben werden können, was im Zusammenhang mit der Historisierung von Verlustdaten zu bedenken ist und wie der Weg von einem reinen Risikomanagement zu einem Chancen- und Risikomanagement führen kann. Der Modellierung von Risikoketten und Abhängigkeiten wird als wichtigster Einzelfrage einer Aggregation breiter Raum geschenkt; dabei werden Unterschiede zwischen Korrelation und Kausalität in der Modellierung herausgearbeitet. Es werden auch Überlegungen zur Szenarioanalyse und zur Steigerung der Modellvalidität vorgestellt. Abschließend werden nach einem kurzen Vergleich mit der Praxis anderer Unternehmen in Kapitel 6 konkrete Anregungen für eine graduelle Weiterentwicklung der Risikomanagementmethode der SAP gegeben.

2. Grundlagen

2.1 Risikobegriff

Die Verwendung des Begriffs *Risiko* ist sowohl im Alltagsgebrauch als auch in der Wissenschaft nicht immer einheitlich. Für eine Arbeit über Risikoaggregation erscheint deshalb die folgende Abgrenzung des Risikobegriffs sinnvoll: Ein Risiko wird durch Ursachen und deren unsichere zukünftige Wirkung auf eigene Ziele beschrieben (vgl. [Die04, S. 10]).

Dabei wird in der Regel nur eine ungünstige Beeinflussung der Ziele betrachtet; günstige Effekte werden dagegen als *Chancen* bezeichnet. Wie in Abschnitt 5.4 näher erläutert, sollte eine aussagekräftige Betrachtung des aggregierten Risikos auch Chancen berücksichtigen.

Die Ursachen lassen sich noch in externe und interne Faktoren aufgliedern. Externe Ursachen liegen außerhalb des eigenen Kontrollbereichs des Unternehmens. Interne Ursachen sind Entscheidungen und (unterlassene) Handlungen im eigenen Unternehmen. Realisierungen von Risiken werden im Folgenden als Ereignisse bezeichnet.

Im derzeitigen Risikomanagement-Modell der SAP wird Risiko als *Gefahr durch potenzielle Störungen der Fähigkeit der SAP, ihre strategischen, finanziellen und betrieblichen Ziele zu erreichen* beschrieben („risk represents the danger posed by potential disruptions to SAP’s ability to achieve its strategic, financial and operational objectives“ [SAP05, S. 2]). Bis auf die fehlende Erwähnung der Ursachen deckt sich diese Definition mit der oben getroffenen Abgrenzung.

2.2 Risikomanagement-Zielsetzungen

Die Bestimmung der Zielsetzung des unternehmensweiten Risikomanagements ist Teil der *Risikopolitik* eines Unternehmens. Mögliche Ziele für das Risikomanagement können zum Beispiel sein,

- die allgemeine Sensibilität des Unternehmens für Risiken zu erhöhen,
- die operativen Bereiche mit einer einheitlichen Methodik und Tools zur Organisation ihrer Risiken zu versorgen,

- den Beitrag der verschiedenen Unternehmensbereiche zum Gesamtrisiko untereinander vergleichbar zu machen,
- die Höhe der Risiken einzelner Unternehmensbereiche von Periode zu Periode vergleichbar zu machen,
- Geschäftseinheiten anhand ihres Risiko-/Ertragsverhältnisses zu bewerten und möglicherweise einen Wettbewerb um ein besseres Risikoprofil zu initiieren,
- Informationen über eingegangene Risiken explizit in die Preiskalkulation einfließen zu lassen,
- das Unternehmen mit seinen Abhängigkeitsstrukturen transparent darzustellen, um kritische Punkte zu identifizieren,
- dem Management zu ermöglichen, seine Risikomanagementmaßnahmen zu priorisieren,
- erhöhte Aufmerksamkeit für bestimmte Themen bei der Unternehmensleitung zu erreichen,
- die Höhe des Eigenkapitals zu bestimmen, das das Unternehmen vorhalten muss, um mögliche Verluste zu tragen und ein bestimmtes Rating zu erreichen oder
- durch den Nachweis des Risikomanagements größeres Vertrauen am Markt zu erreichen, um daraus bei Investoren, Versicherungen und Kunden Vorteile zu erzielen.

Von der Zielsetzung des Risikomanagements hängt es ab, ob eine qualitative Beschreibung der Risiken ausreicht oder ob die Risiken teilweise oder vollständig quantifiziert werden. Die Quantifizierung der Risiken kann unterschiedlich genau und mit unterschiedlichem Aufwand erfolgen. So kann eine Expertenschätzung von genau einer Eintrittswahrscheinlichkeit und einer Schadenshöhe pro Risiko bereits als Quantifizierung gelten. Ebenso kann ein Risiko quantitativ durch zwei Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben werden: einer Verteilung für die Eintrittshäufigkeit und einer Verteilung für die Schadenshöhen. Diese Verteilungen können durch beliebig komplexe Modelle geschätzt werden, die z. B. historische Verlustereignisdaten oder systematische Zusammenhänge berücksichtigen. Auch die Entscheidung über den Genauigkeitsgrad der Quantifizierung und den Komplexitätsgrad der Modellierung von Abhängigkeiten ist mit Blick auf den gewünschten Zweck des Risikomanagements zu treffen.

Bei den Zielsetzungen eines unternehmensweiten Risikomanagements kann zwischen einem *Selbstzweck* und einem *Fremdzweck* des Risikomanagements unterschieden werden. Wird Risikomanagement nur um seiner selbst willen betrieben, so ist es Selbstzweck. Fremdzwecke nutzen Risikomanagement als Werkzeug, um übergeordnete Ziele zu erreichen. Die Erfüllung der gesetzlichen und regulatorischen Anforderung, überhaupt Risikomanagement zu betreiben, ist ein klarer Selbstzweck. Ein Mehrwert wird erst generiert, wenn das Risikomanagementsystem Fremdzwecke zum Hauptzweck macht. Eine sehr treffende Darstellung findet sich bei Meier [Mei05, S. 210–211]:

Systeme haben die fragwürdige Eigenschaft, unter Pflege, Entwicklung, Veränderung und Verbesserung größer und komplexer zu werden. Größe und

Komplexität verlangen Expertentum und besondere Kenntnisse für den Umgang mit dem System. Die Leistung des Systems wird nicht im selben Ausmaß größer, wie das System wächst. Die „Usability“ des Systems nimmt mit dem Wachstum des Systems ab. Die gestiegenen Anforderungen werden als Entschuldigung für diese Folgen der Komplexität hingenommen.

Um diese Verselbständigung des Systems in Grenzen zu halten, muss vor jeder Erweiterung des Risikomanagementsystems die Frage stehen, welcher Zweck damit erreicht werden soll, und ob es ggf. einfachere Mittel zum Erreichen dieses Ziels gibt. Die Erläuterung auch komplexer Methoden für die Aggregation quantifizierter Risiken in dieser Arbeit bedeutet nicht, dass ihre Umsetzung in jedem Fall befürwortet wird. Gerade bei den komplexeren Methoden sollen die Anforderungen an notwendige Daten und erforderliches Fachwissen beleuchtet werden, und der mögliche Nutzen der Methoden soll aufgezeigt werden. Wie oben ausgeführt hängt die endgültige Entscheidung über den Einsatz der Methoden aber von der Risikopolitik des Unternehmens ab, weshalb hier keine abschließenden Empfehlungen gegeben werden können.

2.3 Rechtliche Anforderungen

In diesem Abschnitt soll kurz der „Selbstzweck“ des Risikomanagementsystems beleuchtet werden - die Erfüllung gesetzlicher und regulatorischer Anforderungen. Dabei soll aber vor allem auf das Thema „Risikoaggregation“ abgestellt werden, das auch Thema dieser Arbeit ist. Allgemeinere Erläuterungen zur Regulierung von Risikomanagement finden sich z. B. bei Meier [Mei05, S. 121–138] oder Kajüter [Kaj04].

2.3.1 AktG/KonTraG/TransPuG

Im Aktiengesetz findet sich in § 91 Abs. 2 eine explizite Anforderung für die Durchführung von Risikomanagementmaßnahmen, die mit dem Gesetz zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich (KonTraG) am 01.05.1998 in das Aktiengesetz eingeführt wurde:

Der Vorstand hat geeignete Maßnahmen zu treffen, insbesondere ein Überwachungssystem einzurichten, damit den Fortbestand der Gesellschaft gefährdende Entwicklungen früh erkannt werden.

In diesem Zusammenhang ist häufig von *bestandsgefährdenden Risiken* die Rede. Mit der Formulierung „den Fortbestand der Gesellschaft gefährdende Entwicklungen“ ist eine sehr breite Betrachtungsperspektive gewählt, die nicht auf besonders hohe Einzelrisiken abstellt, sondern gerade auch Risikoabhängigkeiten einbezieht, die erst durch Verkettung bestandsgefährdend werden.

Durch das Transparenz- und Publizitätsgesetz (TransPuG) wurde am 25.07.2002 neben weiteren Änderungen in § 161 AktG die Pflicht für Vorstand und Aufsichtsrat börsennotierter Unternehmen eingeführt, jährlich zu erklären, ob und wie weit den Sollbestimmungen des „Deutschen Corporate Governance Kodex“ entsprochen wird („comply or explain“). Durch diese Pflicht werden die dort enthaltenen Bestimmungen ähnlich wichtig wie die gesetzlich vorgeschriebenen Regeln.

2.3.2 Deutscher Corporate Governance Kodex

In der Fassung vom 2. Juni 2005 enthält der Deutsche Corporate Governance Kodex an mehreren Stellen Hinweise darauf, dass ein besonderes Risikomanagement erfolgen soll [Reg05]. Um den allgemeinen Charakter der Vorschriften deutlich zu machen, werden hier alle vier Erwähnungen des Risikomanagements wiedergegeben.

So heißt es beispielsweise in Ziffer 3.4 des Abschnitts „Zusammenwirken von Vorstand und Aufsichtsrat“:

Der Vorstand informiert den Aufsichtsrat regelmäßig, zeitnah und umfassend über alle für das Unternehmen relevanten Fragen der Planung, der Geschäftsentwicklung, der Risikolage und des Risikomanagements.

Ziffer 4.1.4 im Abschnitt „Vorstand - Aufgaben und Zuständigkeiten“ besagt:

Der Vorstand sorgt für ein angemessenes Risikomanagement und Risikocontrolling im Unternehmen.

Im Abschnitt 5.2 „Aufsichtsrat - Aufgaben und Befugnisse des Aufsichtsratsvorsitzenden“ ist erwähnt:

Der Aufsichtsratsvorsitzende soll mit dem Vorstand, insbesondere mit dem Vorsitzenden bzw. Sprecher des Vorstands, regelmäßig Kontakt halten und mit ihm die Strategie, die Geschäftsentwicklung und das Risikomanagement des Unternehmens beraten.

Unter Ziffer 5.3.2 findet sich unter der Überschrift „Bildung von Ausschüssen“ schließlich die Anforderung, dass durch den Aufsichtsrat ein Prüfungsausschuss (Audit Committee) eingerichtet werden soll, der sich unter anderem mit Fragen des Risikomanagements befasst.

Es ist festzuhalten, dass bereits § 91 Abs. 2 AktG als verpflichtende gesetzliche Regelung spezifischere Angaben zum geforderten Risikomanagement macht als der Deutsche Corporate Governance Kodex. Dessen Ziel ist vor allem die Beschreibung der institutionellen Trennung und Festlegung der Verantwortlichkeiten ohne Beschreibung von Methoden. Für die vorliegende Arbeit ergeben sich deshalb keine eigenen Anforderungen an die Methodik aus dem Kodex.

2.4 Regulatorische und Prüfungs-Anforderungen

2.4.1 IDW-Standard

Nach § 317 Abs. 4 HGB ist bei börsennotierten Aktiengesellschaften die Einrichtung und Wirksamkeit des in § 91 Abs. 2 AktG vorgeschriebenen Frühwarn- und Überwachungssystems im Rahmen der Prüfung des Jahresabschlusses vorgeschrieben. Diese Prüfung erfolgt nach dem Standard IDW PS 340 des Instituts der Wirtschaftsprüfer in Deutschland, der Inhalte und Ablauf der Systemprüfung festlegt [Kaj04, S. 14].

Die Inhalte der Prüfung nach IDW PS 340 sind

- Festlegung der Risikofelder
- Risikoerkennung und -analyse
- Zuordnung von Verantwortlichkeiten und Aufgaben
- Einrichtung eines Überwachungssystems
- Dokumentation

Zur Risikoanalyse gehört ausdrücklich auch die quantitative Beurteilung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkungen sowie – als Treiber der Risikoaggregation – die Einschätzung, ob Einzelrisiken durch Interaktionen oder Kumulation im Zeitablauf zu einem bestandsgefährdenden Risiko führen können [GR05, S. 31].

2.5 Risikomanagement in der betrieblichen Praxis

Risikomanagement findet nicht nur statt, um die gesetzlichen Anforderungen auf Unternehmensebene zu erfüllen. Innerhalb von Projekten und in einzelnen Bereichen (wie Vertrieb) besteht ein hohes eigenes Interesse, Risiken zu managen. Gerade in kundennahen Bereichen ist Risikomanagement ein Teil des täglichen Managements. Eine wichtige Aufgabe ist es, das betriebliche Risikomanagement mit dem unternehmensweiten, eher strategisch ausgerichteten Risikomanagement zu einer ganzheitlichen Methode zu verknüpfen.

2.5.1 Risikomanagement in Projekten

Das US-amerikanische Project Management Institute hat weithin beachtete Richtlinien und „best practice“ über das Projektmanagement im *Project Management Body of Knowledge (PMBOK)* zusammengefasst. Kapitel 11 befasst sich mit dem Risikomanagement in Projekten [Pro04, S. 252–283].

Die Risikomanagementmethode der SAP basiert in großen Teilen auf dem dort vorgeschlagene Vorgehen. Der iterative Risikomanagementprozess gliedert sich in die Stufen der Planung, Identifikation, qualitativen und quantitativen Analyse, Maßnahmenplanung und Überwachung von Risiken. Diese Aufteilung findet sich in ähnlicher Form bei fast allen Methodiken (vgl. Abbildung 3.1 auf S. 24).

Für die Risikoidentifikation werden verschiedene Werkzeuge vorgeschlagen; im Bereich der Diagrammtechniken sind besonders die Einflussdiagramme („influence diagrams“) hervorzuheben [Pro04, S. 263]. Im Verlauf dieser Arbeit wird vorgeschlagen, Risiken in dieser Form zu beschreiben und sie als Grundlage einer unternehmensweiten Risikoaggregation zu verwenden.

Die qualitative Risikoanalyse laut PMBOK entspricht weitgehend dem derzeitigen Status quo der SAP (eine Beschreibung in allgemeiner Form erfolgt in Abschnitt 3.1 ab S. 23). Teil dieser Analyse ist die Beurteilung der identifizierten Risiken nach Eintrittswahrscheinlichkeit (engl.: probability) und Auswirkung (engl.: impact). In einer zweidimensionalen Matrix mit Wahrscheinlichkeiten auf der x-Achse und Auswirkungen auf der y-Achse können die Risiken anschließend dargestellt werden. Die Kategorisierung der Risiken (die auch für die spätere Aggregation der Risiken wichtig ist) ist noch Teil der qualitativen Analyse. Auf dieser Grundlage kann bereits eine Einschätzung der Dringlichkeit und Priorisierung der Risiken erfolgen. Ein Ergebnis der qualitativen Analyse ist das Risikoinventar,

das bei der SAP in der Anwendung „Operational Risk Management“ (ORM) abgelegt wird. Im Vergleich zu anderen Konzernen erreicht die SAP mit diesem Ansatz bereits eine sehr große Tiefe der erhobenen Risiken (vgl. Abschnitt 6.1 auf S. 84).

Als Grundlage der quantitativen Analyse wird im PMBOK vorgeschlagen, durch Expertenbefragungen stochastische Verteilungen über die möglichen Verlusthöhen zu ermitteln (vgl. dazu Abschnitt 5.1 ab S. 53). Diese sollen z. B. für Sensitivitätsanalysen genutzt werden, um die Faktoren mit dem stärksten Einfluss auf das Gesamtergebnis zu ermitteln (vgl. Abschnitt 5.6 ab S. 75). Auch die Ermittlung einer Gesamtverlustverteilung für ein ganzes Projekt durch eine Monte Carlo Simulation wird erwähnt (vgl. Abschnitt 4.3.2 ab S. 45).

Es existieren zahlreiche weitere Leitfäden, die Risikomanagement im Zusammenhang mit Projekten beschreiben. Einen breiten Überblick der für IT-Projekte im Allgemeinen und Softwareentwicklung im Besonderen relevanten Bewertungsmethoden (CMM¹, BOOTSTRAP, SPICE²) und Risikomanagementanleitungen (DIN 62198, CCTA³ Risk Handbook) findet sich bei Gaulke [Gau04, S. 24–37]. Die Modelle CMMI⁴, SPICE und SPMN⁵ sind bei Wallmüller [Wal04, S. 90–98] beschrieben.

2.5.2 Strategisches und operatives Risikomanagement

Auch wenn die Methoden für das Risikomanagement in Projekten und Geschäftsbereichen viel mit den Methoden eines unternehmensweiten Risikomanagements gemeinsam haben, gibt es doch eine beträchtliche Lücke zwischen der Datenerhebung „vor Ort“ und der Nutzung dieser Informationen für die Risikoberichterstattung an den Vorstand mit dem Ziel, neben der Erfüllung gesetzlicher und regulatorischer Anforderungen auch Steuerungsinformationen für den Umgang mit Risiken zu generieren.

Konkrete Probleme bei der Nutzung des bestehenden Risikoinventars sind unter anderem:

- unterschiedliche Granularität und Abstraktheit der Information auf verschiedenen Ebenen,
- Qualität der Daten,
- mangelnde Quantifizierung und
- mangelnde Information über die Zusammenhänge der Risiken.

Wenn das operative Risikomanagement langfristig als Quelle des strategischen Risikomanagements dienen soll, sind diese Herausforderungen durch ein integriertes Modell zu lösen, das die quantitative Beschreibung aller Risiken und ihrer Zusammenhänge vorsieht. Auch auf dem Weg zu diesem Ziel lassen sich graduelle Verbesserungen der Analysemöglichkeiten für Risiken erreichen. In letzter Konsequenz muss das Risikomanagement auf allen Ebenen in die Planungsprozesse integriert werden.

¹Capability Maturity Model

²Software Process Improvement and Capability dEtermination

³UK Central Computer and Telecommunications Agency

⁴Capability Maturity Model Integration

⁵Software Process Managers Network, s. <http://www.spmn.com/>

2.6 Wahrscheinlichkeitstheoretische Grundlagen

In dieser Arbeit werden einige Begriffe und Konzepte aus der Wahrscheinlichkeitstheorie verwendet. Weil nicht vorausgesetzt werden soll, dass dem an Risikomanagement interessierten Leser alle Definitionen und Fachbegriffe geläufig sind, erfolgt in dieser Arbeit eine möglichst kurze Erklärung. Der interessierte Leser wird für weitergehende Ausführungen auf gängige Lehrbücher der Statistik verwiesen, z. B. Bol [Bol98] oder Capiński [CK99]. Um den Lesefluss nicht zu stören, sind die Definitionen in diesem Abschnitt der Arbeit vorangestellt, die bei der Verwendung des jeweiligen Begriffs im Text ggf. referenziert werden.

2.6.1 Wahrscheinlichkeitstheoretisches Modell

Ein wahrscheinlichkeitstheoretisches Modell enthält folgende drei Komponenten:

1. Die Grundgesamtheit Ω von Elementarereignissen ω ; ein Elementarereignis kann zum Beispiel sein, dass in einer Stichprobe eine bestimmte Zahl an defekten Teilen vorkommt.
2. Ein Mengensystem der Ereignisse $A(\Omega)$.
3. Ein Wahrscheinlichkeitsmaß P .

2.6.1.1 Sigma-Algebra

Sei $\Omega \neq \emptyset$. Eine Menge $A(\Omega)$ von Teilmengen von Ω heißt σ -Algebra, wenn sie folgende Eigenschaften erfüllt [Bol98, S. 17]:

$$\Omega \in A(\Omega), \quad (2.1a)$$

$$A \in A(\Omega) \Rightarrow \Omega \setminus A \in A(\Omega), \quad (2.1b)$$

$$A_i \in A(\Omega) \text{ für } i = 1, 2, 3, \dots \Rightarrow \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i \in A(\Omega) \quad (2.1c)$$

Ausformuliert lauten die Bedingungen:

- $A(\Omega)$ enthält die Menge aller Elementarereignisse Ω ,
- wenn $A(\Omega)$ eine bestimmte Teilmenge A von Ω enthält, dann enthält $A(\Omega)$ auch deren Komplement $\Omega \setminus A$,
- wenn $A(\Omega)$ zwei oder mehr Teilmengen von Ω enthält, dann enthält $A(\Omega)$ auch deren Vereinigungsmenge.

2.6.2 Wahrscheinlichkeitsraum

Ein *Wahrscheinlichkeitsraum* ist ein Tripel $(\Omega, \mathcal{A}(\Omega), P)$, wobei Ω eine beliebige Menge von Elementarereignissen, $\mathcal{A}(\Omega)$ eine σ -Algebra von Teilmengen aus Ω und P ein Maß auf $\mathcal{A}(\Omega)$ ist, so dass

$$P(A) \geq 0 \text{ für alle } A \in \mathcal{A}(\Omega) \quad (2.2a)$$

$$\text{für } A_i, i = 1, 2, 3, \dots \text{ mit } A_i \cap A_j = \emptyset \text{ für } i \neq j \text{ gilt: } P\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} P(A_i) \quad (2.2b)$$

$$P(\Omega) = 1. \quad (2.2c)$$

P heißt dann *Wahrscheinlichkeitsmaß* oder kurz *Wahrscheinlichkeit*.

Eigenschaft (2.2b) heißt Sigma-Additivität. Sie bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit einer Menge, die in disjunkte Bestandteile zerlegt ist, durch Addition der Wahrscheinlichkeiten der Bestandteile ermittelt werden kann.

2.6.3 Zufallsvariablen

In der Folge wird häufig von *Zufallsvariablen* gesprochen. Darunter kann eine messbare Funktion verstanden werden, die Ergebnissen eines Zufallsexperiments Zahlen zuordnet. Die formale Definition einer Zufallsvariablen $X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ aus dem Wahrscheinlichkeitsraum (Ω, \mathcal{F}, P) ist:

$$\{\omega \in \Omega : X(\omega) \leq a\} \in \mathcal{F}, \quad (2.3)$$

d.h. für alle $a \in \mathbb{R}$ liegt die Menge $X^{-1}([a, \infty))$ in \mathcal{F} [CK99, S. 64].

2.6.3.1 Verteilungsfunktion

Die Funktion, die die Wahrscheinlichkeit dafür angibt, dass die Zufallsvariable X einen Wert kleiner oder gleich einer Zahl α annimmt, heißt *Verteilungsfunktion von X* . Diese Funktion $F_X : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ ist definiert als

$$F_X(\alpha) = P_X((-\infty, \alpha]) = P(X \leq \alpha). \quad (2.4)$$

Durch die Verteilungsfunktion F_X ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung von X eindeutig festgelegt [Bol98, S. 42].

2.6.3.2 Diskrete Zufallsvariablen

Sei $X : (\Omega, \mathcal{A}(\Omega), P) \rightarrow \mathbb{R}$ eine Zufallsvariable. X heißt *diskret*, wenn es Zahlen $\alpha_1, \alpha_2, \dots \in \mathbb{R}$ gibt mit

$$X(\omega) \in \{\alpha_i | i = 1, 2, 3, \dots\} \text{ für alle } \omega \in \Omega.$$

Eine diskrete Zufallsvariable X nimmt endlich viele oder abzählbar unendlich viele Werte x_i an. Anders gesagt ist eine Zufallsvariable *diskret*, wenn jedem der Elementarereignisse eine Wahrscheinlichkeit p_i zugeordnet werden kann. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist im diskreten Fall durch

$$P(X = \alpha_i) = p_i \text{ für } i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.5)$$

gegeben, wobei $p_i \geq 0$ und $\sum_{i=1}^{\infty} p_i = 1$.

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion lässt sich im diskreten Fall durch ein Histogramm wie in Abbildung 2.1(a) visualisieren.

2.6.3.3 Stetige Zufallsvariablen

Sei $X : (\Omega, \mathcal{A}(\Omega), P) \rightarrow \mathbb{R}$ eine Zufallsvariable mit Verteilungsfunktion $F_X : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$. X heißt *stetig*, wenn es eine Funktion $f_X : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ gibt, mit

$$F_X(\alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} f(x) dx \text{ für alle } \alpha \in \mathbb{R}. \quad (2.6)$$

$f(x)$ heißt *Dichtefunktion* von X .

2.6.3.4 Zusammenhang von Verteilungs- und Dichtefunktion

Aus Abbildung 2.3 lässt sich der Zusammenhang der Dichtefunktion $f_X(x)$ einer stetigen Zufallsvariablen und der Verteilungsfunktion $F_X(x)$ ansehen. Die Verteilungsfunktion $F_X(\alpha)$ an der Stelle α ist genau das Integral der Dichtefunktion $\int_{-\infty}^{\alpha} f_X(x) dx$ und gibt wie erwähnt die Wahrscheinlichkeit für Werte kleiner α an.

2.6.3.5 Gemischte diskrete und stetige Verteilung

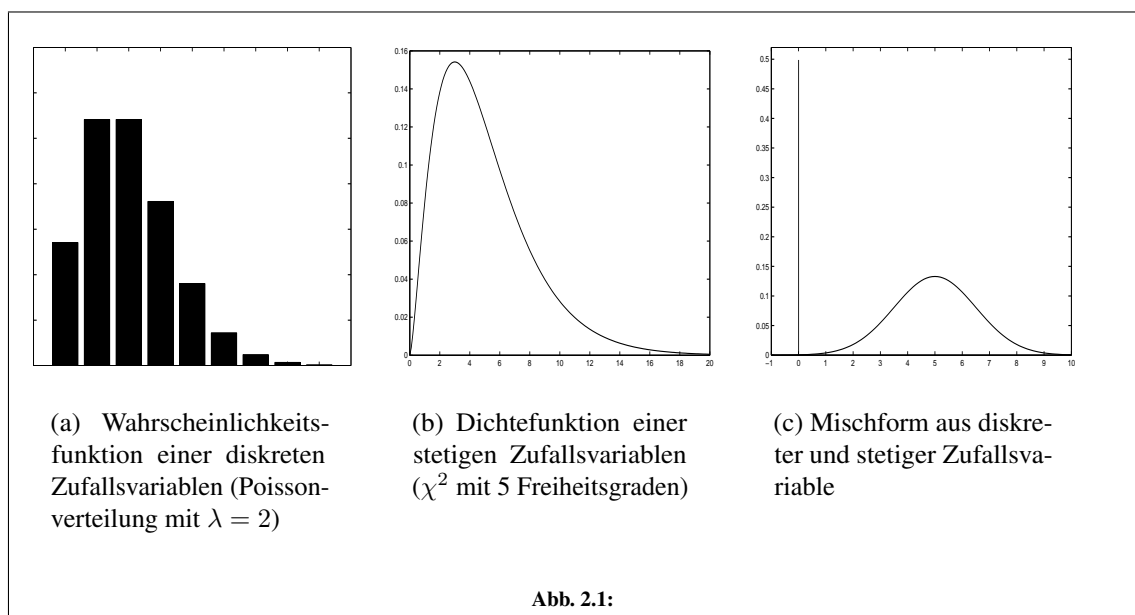


Abbildung 2.1(c) zeigt einen für das Risikomanagement wichtigen Sonderfall - die Mischung einer diskreten mit einer kontinuierlichen Verteilung. In dem Beispiel liegen 50 % der Wahrscheinlichkeitsmasse an der Stelle 0, weitere 50 % verteilen sich in Form einer Normalverteilung mit den Parametern für Mittelwert $\mu = 5$ und Standardabweichung $\sigma = 1,5$ auf die übrigen Werte aus x (die Werte auf der x-Achse kann man sich als Verlusthöhen in Geldeinheiten, zum Beispiel $-T\text{€}$, vorstellen). Dieser Fall kann so interpretiert werden, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Risiko überhaupt eintritt, 50 % beträgt. Im Fall des Eintritts verhält sich die Höhe des tatsächlich zu beobachtenden Schadens dann entsprechend einer Normalverteilung mit den genannten Parametern. Das Diagramm zeigt also die *Gesamtverlustverteilung* des Risikos.

2.6.4 Zentrale Momente von Verteilungen

2.6.4.1 Erwartungswert

Sei X eine diskrete Zufallsvariable X mit den Werten $\alpha_i, i = 1, 2, 3, \dots$ und $\alpha_i \neq \alpha_j$ für $i \neq j$. Der Erwartungswert von X ist definiert als die Summe ihrer möglichen Werte, gewichtet mit ihrer jeweiligen Wahrscheinlichkeit:

$$E(X) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \cdot P(X = \alpha_i). \quad (2.7)$$

Ist X eine stetige Zufallsvariable mit Dichte f , so ist der Erwartungswert definiert als

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx \quad (2.8)$$

mit $f(x)$ als Dichtefunktion von X .

Für eine n -dimensionale Zufallsvariable $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$ gilt

$$E(Y_1 + \dots + Y_n) = E(Y_1) + \dots + E(Y_n) \quad (2.9)$$

für den gemeinsamen Erwartungswert. Diese Eigenschaft nennt sich *Additivität des Erwartungswerts* (Beweis s. [Bol98, S. 185–186]).

2.6.4.2 Varianz

Sei X eine diskrete Zufallsvariable X mit den Werten $\alpha_i, i = 1, 2, 3, \dots, \alpha_i \neq \alpha_j$ für $i \neq j$ und dem Erwartungswert $E(X)$. Dann heißt

$$\text{Var}(X) = \sigma_X^2 = \sum_{i=1}^{\infty} (\alpha_i - E(X))^2 \cdot P(X = \alpha_i). \quad (2.10)$$

Varianz von X .

Ist X eine stetige Zufallsvariable mit Dichte f und Erwartungswert $E(X)$, dann berechnet sich die Varianz von X als

$$\text{Var}(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))^2 f(x) dx. \quad (2.11)$$

Die Varianz bezeichnet den Durchschnitt der Abweichungsquadrate vom Durchschnitt einer Zufallsvariablen X .

Die Standardabweichung ist als Wurzel der Varianz definiert:

$$S(X) = \sigma_X = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (2.12)$$

Es gibt Zufallsvariablen, für die sich kein Erwartungswert und keine Varianz berechnen lassen.

2.6.4.3 Schiefe

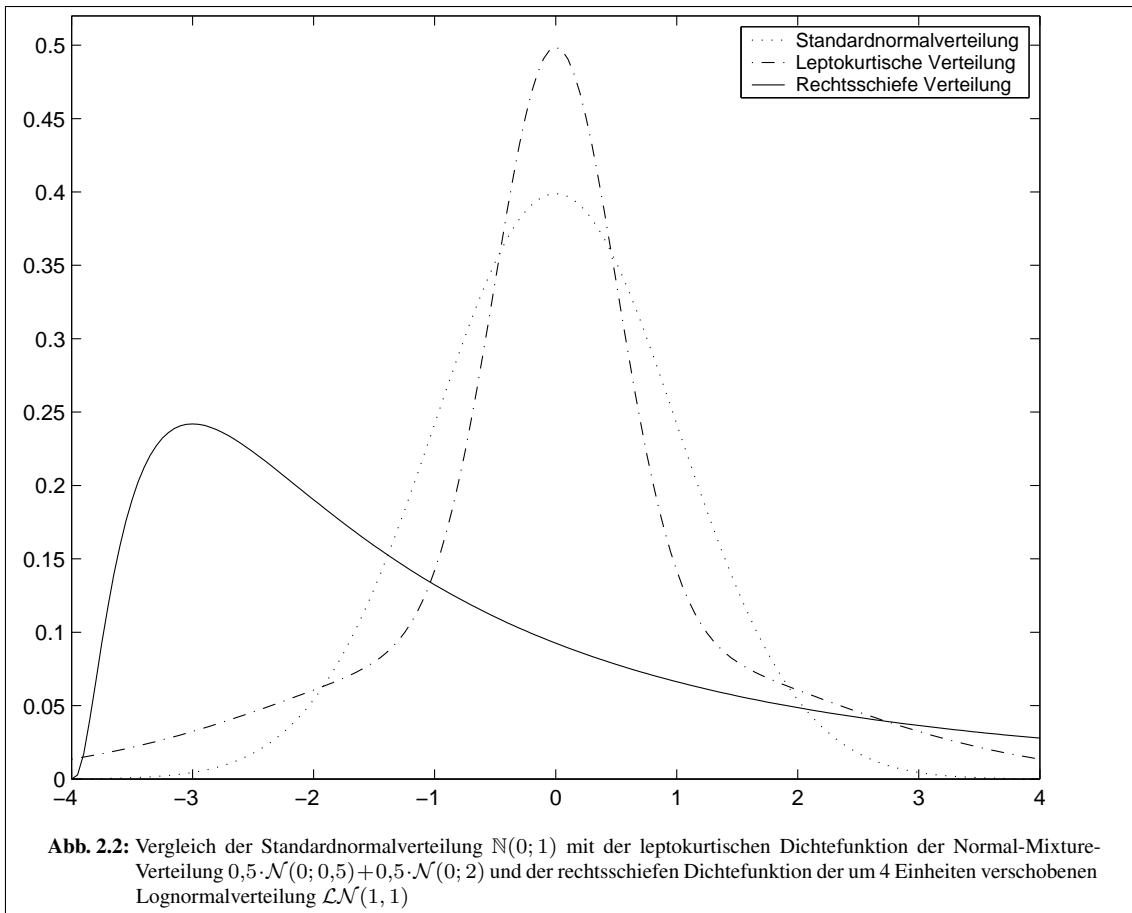
Die *Schiefe* einer Zufallsvariablen X mit Erwartungswert μ und Varianz σ^2 ist ein Maß für die Symmetrie der Verteilung von X zum Mittelwert und ist definiert als

$$S(X) = \frac{\mathbb{E}[(X - \mu)^3]}{\sigma^3}. \quad (2.13)$$

Ist die Schiefe positiv, so ist die Verteilung rechtsschief bzw. linkssteil, das heißt es gibt viele Realisierungen im niedrigen Bereich und wenige Realisierungen im sehr hohen Bereich. Aggregierte Risikoverteilungen im Bereich von Betriebsrisiken weisen häufig eine Rechtsschiefe auf, weil vielen kleinen Verlustereignissen einige sehr hohe Verluste gegenüberstehen.

Ist $S(X) = 0$ so ist die Verteilung von X symmetrisch um den Mittelwert. Die Normalverteilung ist immer symmetrisch.

Die Schiefe heißt auch das *dritte zentrale Moment* einer Verteilung.



2.6.4.4 Kurtosis

Die *Kurtosis* einer Zufallsvariablen X mit Erwartungswert μ und Varianz σ^2 ist ein Maß für die Wölbung der Verteilung von X . Sie ist definiert als

$$K(X) = \frac{\mathbb{E}[(X - \mu)^4]}{\sigma^4}. \quad (2.14)$$

Die Kurtosis der Normalverteilung mit beliebigem μ , σ beträgt 3. Deshalb wird auch die sog. „Exzess Kurtosis“ bzw. „Fisher Kurtosis“

$$K'(X) = K(X) - 3 \quad (2.15)$$

verwendet, um die Kurtosis in Relation zur Normalverteilung zu setzen. Viele Statistikprogramme berechnen direkt die „Fisher Kurtosis“ [RMF05, S. 56].

Verteilungen mit $K'(X) < 0$ heißen *flachgipflig* oder *platykurtisch*, Verteilungen mit $K'(X) > 0$ heißen *spitzgipflig* oder *leptokurtisch*. Verteilungen mit $K'(X) = 0$ werden auch als *mesokurtisch* bezeichnet, wenn diese Tatsache hervorgehoben werden soll.

Die Kurtosis wird auch als *viertes zentrales Moment* einer Verteilung bezeichnet.

2.6.5 Quantil

Das α -Quantil q_α einer Verteilungsfunktion $F(X)$ gibt den Wert an, der die unteren α % der Wahrscheinlichkeitsmasse von den oberen $1 - \alpha$ % der Wahrscheinlichkeitsmasse trennt. Die Zufallsvariable X nimmt dann mit Wahrscheinlichkeit α einen Wert kleiner oder gleich q_α an. Die formale Definition des α -Quantils ist:

$$q_\alpha = F^{-1}(\alpha), \quad (2.16)$$

wobei $F^{-1}(X)$ die Umkehrfunktion der Verteilungsfunktion ist. Das 50-%-Quantil heißt *Median*.

Der *Value at Risk* ist das α -Quantil einer Verlustverteilung (s. Abschnitt 4.2.2 auf S. 40). Für die Darstellung eines Quantils vgl. Abbildung 2.3.

2.6.6 Multivariate Zufallsvariablen

Wenn mehrere Zufallsereignisse zusammen betrachtet werden, dann ist meistens ihr *gemeinsames* Verhalten von Interesse. Es reicht nicht mehr aus, die Wahrscheinlichkeitsverteilung jeder einzelnen Zufallsvariablen getrennt zu betrachten. Es ist auch genau der Gegenstand einer Risikoaggregation, das gemeinsame Verhalten mehrerer Risiken zu analysieren.

Zur Beschreibung solcher Prozesse geht man zur Betrachtung einer *k-dimensionalen Zufallsvariablen* über:

Sei $(\Omega, A(\Omega), P)$ ein Wahrscheinlichkeitsraum und $X_1, \dots, X_k : (\Omega, A(\Omega), P) \rightarrow \mathbb{R}$ jeweils eine Zufallsvariable. Dann heißt $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_k)$ *k-dimensionale Zufallsvariable* $X : (\Omega, A(\Omega), P) \rightarrow \mathbb{R}^k$ [Bol98, S. 129].

2.6.6.1 Gemeinsame Verteilung

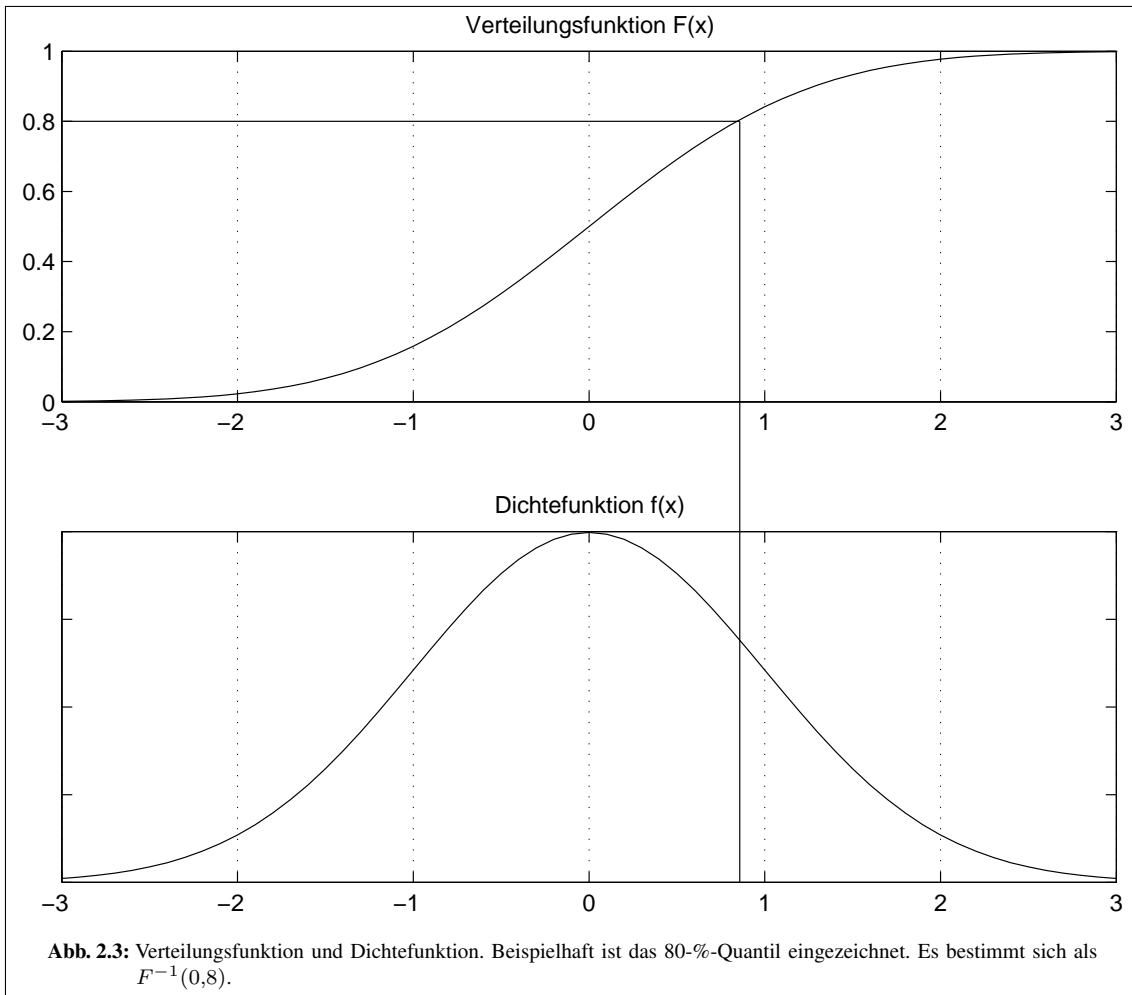
Sei X nun eine mehrdimensionale Zufallsvariable. Die Abbildung $F : \mathbb{R}^k \rightarrow [0, 1]$ mit

$$F(\alpha) = P(X \leq \alpha) = P(X_1 \leq \alpha_1, X_2 \leq \alpha_2, \dots, X_k \leq \alpha_k) \text{ (im stetigen Fall)} \quad (2.17)$$

und

$$F(x) = P(X = x) = P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_k = x_k) \text{ (im diskreten Fall)} \quad (2.18)$$

heißt *gemeinsame Verteilungsfunktion* von X [Bol98, S. 131].



2.6.6.2 Randverteilung

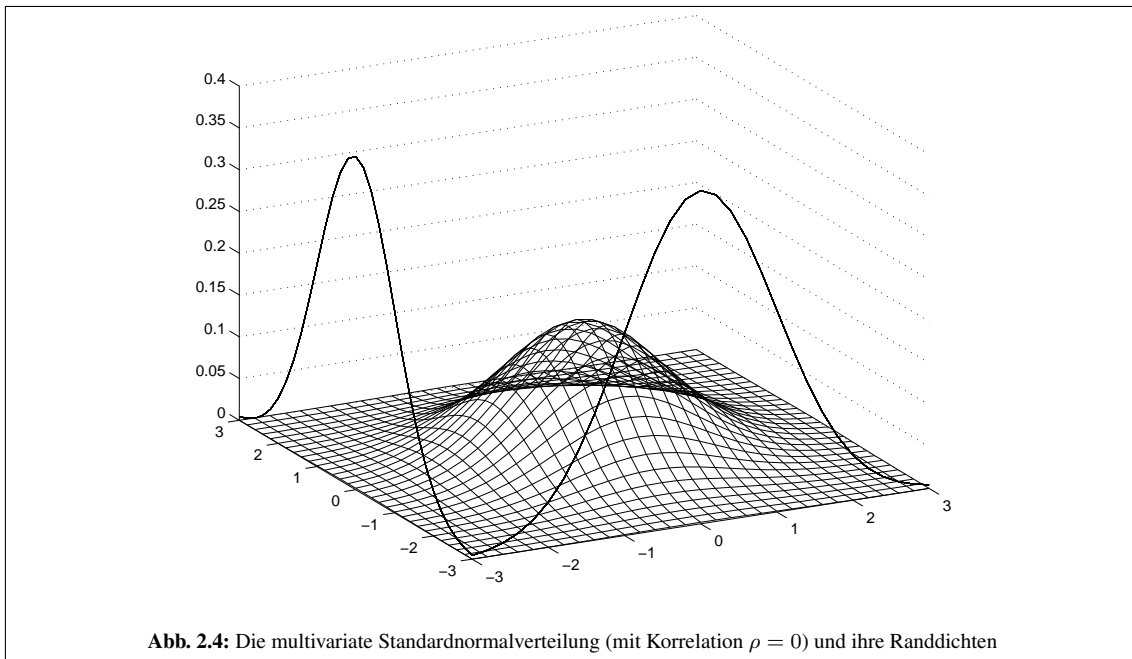
Seien X, Y zwei Zufallsvariablen, die auf dem selben Wahrscheinlichkeitsraum definiert sind. Ist die gemeinsame (bivariate) Dichtefunktion von X und Y gegeben, dann lässt sich die *Randdichteverteilung* von X als die univariate Dichtefunktion $f_X(x)$ ansehen, die keine Informationen über Y enthält. Die Randdichte wird durch Aufsummieren (im diskreten Fall) bzw. Integrieren (im stetigen Fall) über Y gewonnen [Bol98, S. 143]:

$$f_X(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x, y) dy \quad (2.19)$$

Die Randverteilung $F_X(\alpha)$ von X an der Stelle α ergibt sich konsequenterweise durch Integrieren der Dichtefunktion $f(x)$:

$$F_X(\alpha) = \int_{-\infty}^{\alpha} \left(\int_{-\infty}^{\infty} f_{X,Y}(x, y) dy \right) dx. \quad (2.20)$$

Im multivariaten Fall (mit mehr als zwei Zufallsvariablen) wird über alle Zufallsvariablen bis auf diejenige, deren Randverteilung gesucht ist, aufsummiert bzw. integriert [Bol98, S. 142–143].



In Abbildung 2.4 ist als Beispiel für den Zusammenhang zwischen Randdichten und gemeinsamer Dichtefunktion die multivariate Standardnormalverteilung abgebildet. Die Randdichten der zwei Zufallsvariablen sind (univariat) standardnormalverteilt. Die Höhe der Randdichte ergibt sich an jedem Punkt, wenn entlang eines „Schnitts“ durch die multivariate Verteilung integriert wird.

Im Risikomanagement kommt häufig der umgekehrte Fall vor, dass die Randverteilungen mehrerer Risiken vorliegen und die gemeinsame Verteilung ermittelt werden soll. Das ist nur möglich, wenn zusätzlich das gemeinsame Verhalten von X und Y beschrieben wird. Sind die Randverteilungen ausschließlich elliptisch verteilt (s. Abschnitt 2.6.6.4), kann die Abhängigkeit durch eine *Korrelationsmatrix* vollständig beschrieben werden. Bei anderen Verteilungen wird dazu in der Regel eine *Copula* benötigt.

2.6.6.3 Korrelation

Die Korrelation ist eine normierte Form der Kovarianz (für die folgenden Sätze vgl. [Bol98, S. 172–174]).

Sei (X, Y) eine zweidimensionale Zufallsvariable, so berechnet man die Kovarianz von X und Y

1. im diskreten Fall:

$$\text{Cov}(X, Y) = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (x_i - E(X))(y_j - E(Y))P(X = x_i, Y = y_j), \quad (2.21)$$

wobei $x_i, i \in I \subset \mathbb{N}$ und $y_j, j \in J \subset \mathbb{N}$ die Werte von X bzw. Y seien,

2. im stetigen Fall:

$$\text{Cov}(X, Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - E(X))(y - E(Y))f_{(X,Y)}(x, y) dx dy. \quad (2.22)$$

Aus der Definition ergibt sich die Symmetrie der Kovarianz:

$$Cov(X, Y) = Cov(Y, X). \quad (2.23)$$

Weiterhin gilt:

$$Cov(\alpha X + \beta, \gamma Y + \delta) = \alpha \cdot \gamma \cdot Cov(X, Y), \quad (2.24)$$

d.h. die Kovarianz ist abhängig vom Maßstab der Zufallsvariablen. So erhält man beispielsweise die zehnfache Kovarianz, wenn man statt X die Zufallsvariable $10 \cdot X$ betrachtet.

Durch die folgende Normierung erhält man für eine zweidimensionale Zufallsvariable mit $Var(X) \neq 0$ und $Var(Y) \neq 0$ ein Maß ohne diese Eigenschaft:

$$\rho(X, Y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X) \cdot Var(Y)}}, \quad (2.25)$$

den *Korrelationskoeffizienten* von X und Y . Es gilt:

$$-1 \leq \rho(X, Y) \leq 1. \quad (2.26)$$

Wie gewünscht gilt für die Korrelation

$$\rho(\alpha X + \beta, \gamma Y + \delta) = \rho(X, Y) \text{ für } \alpha > 0, \gamma > 0. \quad (2.27)$$

Die *Varianz-Kovarianz-Matrix* ist eine kompakte Darstellung der Varianzen der einzelnen Zufallsvariablen und der jeweiligen paarweisen Kovarianzen einer mehrdimensionalen Zufallsvariablen $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$:

$$Cov(X) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma_n^2 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

mit $\sigma_{ij} = E[(X_i - E(X_i))(X_j - E(X_j))]$ für alle $i, j = 1, \dots, n$.

Die *Korrelationsmatrix* ρ gibt die paarweisen Korrelationskoeffizienten von X an:

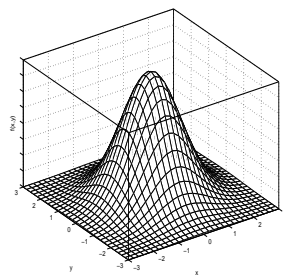
$$Corr(X) = \rho_X = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

mit $\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sigma_i \cdot \sigma_j}$.

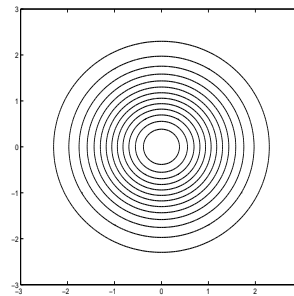
Sowohl Varianz-Kovarianz-Matrix als auch Korrelationsmatrix sind symmetrisch, d. h. es gilt $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ bzw. $\rho_{ij} = \rho_{ji}$.

In Abbildung 2.5 sind verschiedene Beispiele für die bivariate Normalverteilung mit unterschiedlichen Korrelationskoeffizienten gezeigt. Für die Randdichten gilt in jedem Fall $f(x) \sim \mathcal{N}(0, 1)$ und $f(y) \sim \mathcal{N}(0, 1)$.

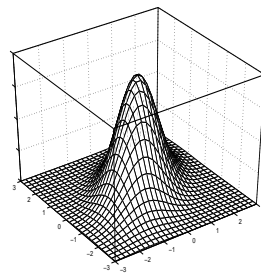
Die Korrelation gibt den Grad an, zu dem sich zwei Variablen in die gleiche Richtung bewegen. Sind zwei Zufallsvariablen X und Y positiv korreliert, so gehen große Werte



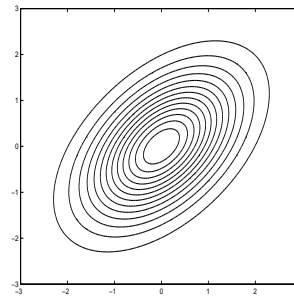
(a) $\rho = 0$ (Unabhängigkeit)



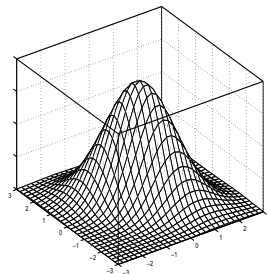
(b) $\rho = 0$ (Unabhängigkeit)



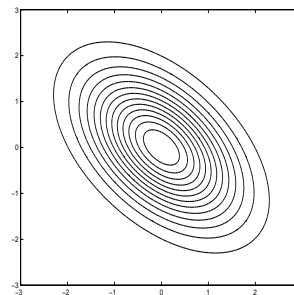
(c) $\rho = 0,5$



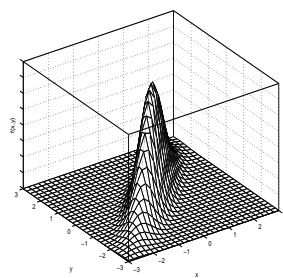
(d) $\rho = 0,5$



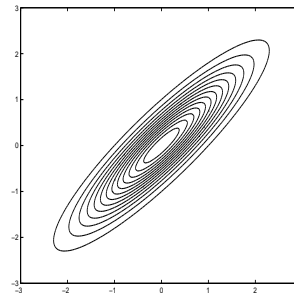
(e) $\rho = -0,5$



(f) $\rho = -0,5$



(g) $\rho = 0,9$



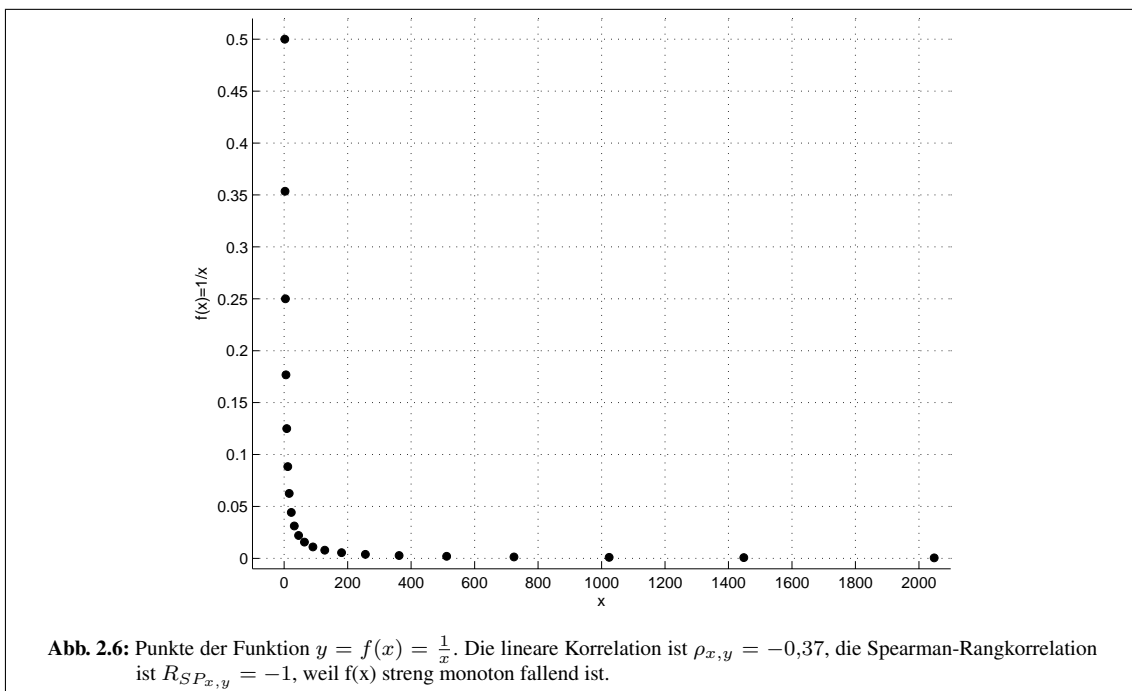
(h) $\rho = 0,9$

Abb. 2.5: Multivariate Normalverteilungen, jeweils mit $\mu = 0$ und $\sigma = 1$, aber unterschiedlicher Korrelation ρ . Links als 3D-Plot, rechts als Konturdiagramm. Die Randverteilung X und Y ist immer jeweils die Standardnormalverteilung!

von X tendenziell mit großen Werten von Y einher. Dabei ist über die *Abhängigkeit* der Variablen jedoch nichts gesagt, d. h. die Korrelation gibt nicht an, ob eine Variable die andere beeinflusst oder umgekehrt, oder ob beide von einem gemeinsamen dritten Faktor abhängen. Es gilt der Satz aus der deskriptiven Statistik, nach dem zwei unabhängige Ereignisse immer auch unkorreliert sind, die Umkehrung aber nicht immer gilt.

Bei der Korrelation ist ferner zu unterscheiden, welches Maß für sie verwendet wird. In Gleichung 2.25 ist die Formel für den Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizienten als Maß für den Grad der linearen Korrelation dargestellt. Es gibt jedoch noch die Möglichkeit, die Korrelation nur anhand des Ranges von Zahlen zu bestimmen⁶. Aus dem Rang lässt unabhängig von der absoluten Höhe der Werte der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient bestimmen:

$$R_{SP} = \frac{\sum_i (rg(x_i) - \overline{rg_x})(rg(y_i) - \overline{rg_y})}{\sqrt{\sum_i (rg(x_i) - \overline{rg_x})^2} \sqrt{\sum_i (rg(y_i) - \overline{rg_y})^2}} \quad (2.30)$$



Rangkorrelierte Zufallsvariablen müssen nicht in gleichem Maße linear korreliert sein. Dieser Effekt tritt bei dem Beispiel aus Abbildung 2.6 auf. Die dargestellte Funktion $f(x) = \frac{1}{x}$ ist streng monoton fallend, d. h. $x_i < x_j \Rightarrow f(x_i) > f(x_j)$ für alle i, j ; daraus folgt direkt, dass der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient -1 ist. Der (lineare) Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient berechnet sich für diese Funktion jedoch nur zu $-0,3692$.

2.6.6.4 Elliptische Verteilungen

Die multivariate Normalverteilung ist ein Spezialfall der Klasse der *elliptischen Verteilungen*. Diese soll hier nur qualitativ beschrieben werden; für eine genauere Definition s. Bradley [BT03].

⁶Der Rang bezeichnet die Position eines Werts in einer sortierten Liste. In der Liste (3,5; 5; 9; 22) hat zum Beispiel der Wert 9 den Rang 3.

Einfach gesagt ist ein Vektor X von Zufallsvariablen *elliptisch verteilt*, wenn die Form aller Höhenlinien im Konturdiagramm eine elliptische Form besitzt.

Elliptische Verteilungen besitzen die Eigenschaft, dass sie durch die Angabe ihrer Randverteilungen in Kombination mit einer Korrelationsmatrix eindeutig spezifiziert werden können. Bei nicht elliptischen Verteilungen muss der Zusammenhang der Variablen dagegen durch eine Copulafunktion angegeben werden, damit die gemeinsame Verteilung eindeutig spezifiziert ist [RMF05, S. 72].

2.6.6.5 Copulafunktionen

Das Wort *Copula* kommt aus dem Lateinischen und bedeutet so viel wie „Band, Bindemittel, Verbindung“. Copulafunktionen erfüllen den Zweck, „multivariate Verteilungsfunktionen mit ihren eindimensionalen Randverteilungen zu vereinen bzw. zu koppeln“ [Nel99, S. 1].

Im Folgenden seien X und Y zwei Zufallsvariablen mit den Verteilungsfunktionen $\mathbb{R} \rightarrow [0, 1] : F_X(x) = P(X \leq x) = u$ und $\mathbb{R} \rightarrow [0, 1] : F_Y(y) = P(Y \leq y) = v$ sowie der gemeinsamen (multivariaten) Verteilungsfunktion $\mathbb{R}^2 \rightarrow [0, 1] : F_{X,Y}(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y)$. Die Funktionswerte von $F_X(x)$, $F_Y(y)$ und $F_{X,Y}(x, y)$ liegen alle im Intervall $I = [0, 1]$. Jedem Paar von reellen Zahlen (x, y) wird durch F_X und F_Y ein korrespondierender Punkt im Einheitsquadrat $I^2 = [0, 1] \times [0, 1]$ zugeordnet. Die Copula $I^2 \rightarrow I : C^\perp(u, v)$ bildet das Rechteck $[0, u] \times [0, v]$ auf eine eindeutige Zahl im Intervall $[0, 1]$ ab. Damit gilt $F_{X,Y}(x, y) = C^\perp(F_X(x), F_Y(y))$.

Funktionen, die das leisten, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Nelsen [Nel99, S. 8] gibt folgende Definition: Eine *Copula* ist eine Funktion C^\perp von I^2 nach I mit den folgenden Eigenschaften:

1. Für alle u, v in I ,

$$C^\perp(u, 0) = 0 = C^\perp(0, v) \quad (2.31)$$

und

$$C^\perp(u, 1) = u \text{ und } C^\perp(1, v) = v; \quad (2.32)$$

2. Für alle u_1, u_2, v_1, v_2 in I mit $u_1 \leq u_2$ und $v_1 \leq v_2$,

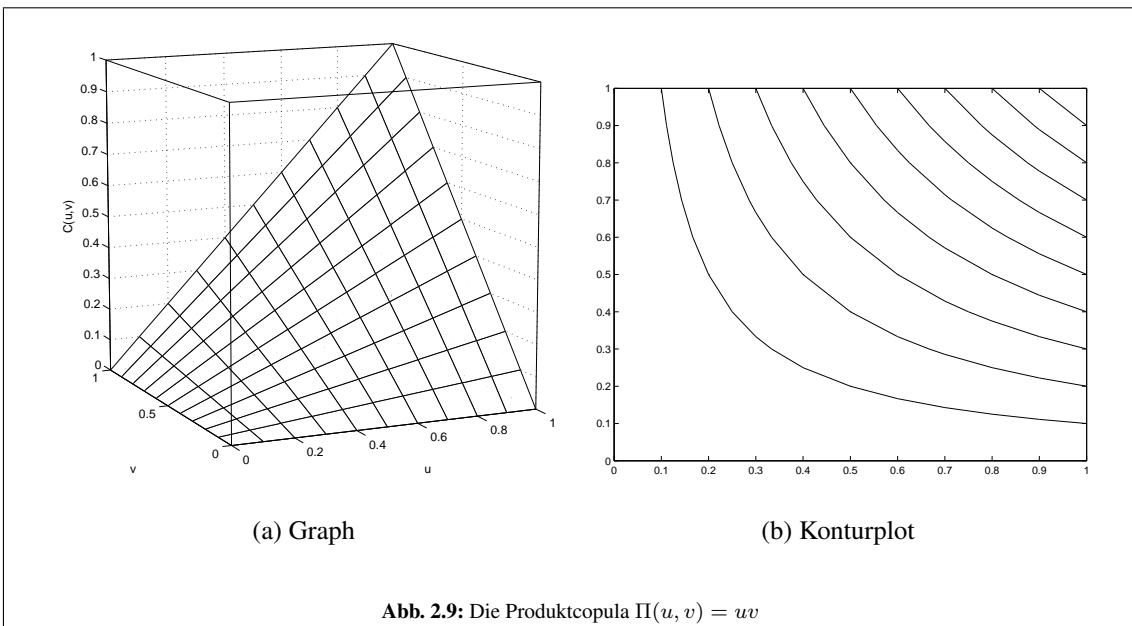
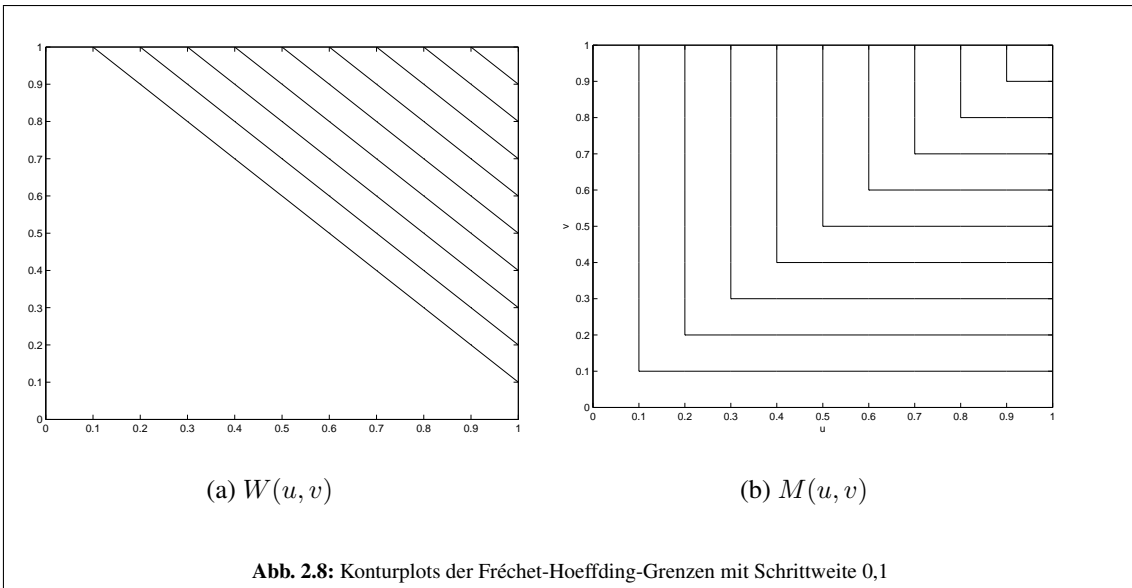
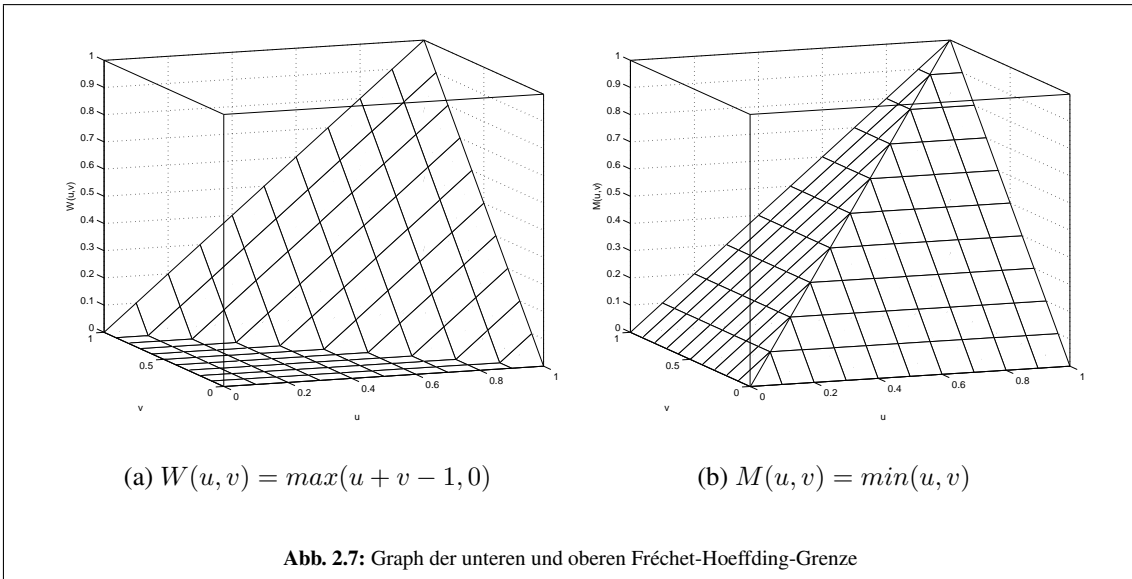
$$C^\perp(u_2, v_2) - C^\perp(u_2, v_1) - C^\perp(u_1, v_2) + C^\perp(u_1, v_1) \geq 0. \quad (2.33)$$

Der Graph jeder Copula hat eine stetige Oberfläche im Einheitswürfel I^3 innerhalb der Grenzen des schiefen Vierecks mit den Eckpunkten $(0, 0, 0)$, $(1, 0, 0)$, $(1, 1, 1)$ und $(0, 1, 0)$, das durch die Fréchet-Hoeffding-Grenzen

$$W(u, v) = \max(u + v - 1, 0) \leq C^\perp(u, v) \leq M(u, v) = \min(u, v) \quad (2.34)$$

vorgegeben wird [Nel99, S. 9–10]. Diese werden in den Abbildungen 2.7 und 2.8 visualisiert. Die obere Fréchet-Hoeffding-Grenze steht dabei für den Fall, dass beide Zufallsvariablen perfekt positiv abhängig (komonoton) sind. Der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient ρ_S ist bei Anwendung von $M(u, v)$ als Copula immer 1, die Umkehrung gilt jedoch nicht. Analog steht der Fall $C^\perp(u, v) = W(u, v)$ für so genannte kontramotone Abhängigkeit mit $\rho_S = -1$ [EP05, S. 19].

Die einfachste und bekannteste Copula ist die *Produktcopula* $\Pi(u, v) = u \cdot v$, die den Fall der Unabhängigkeit von X und Y modelliert (vgl. Abbildung 2.9).



2.6.7 Bedingte Wahrscheinlichkeit

Im Zusammenhang mit der Betrachtung abhängiger Ereignisse, zum Beispiel für die Berechnungen in einem Bayes-Netzwerk, werden Rechenregeln für *bedingte Wahrscheinlichkeiten* benötigt. Beeinflusst ein Ereignis A ein Ereignis B , so gibt die bedingte Wahrscheinlichkeit an, wie sich B verhält, wenn A eintritt. Die formale Schreibweise des bedingten Wahrscheinlichkeitsmaßes im diskreten Fall

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} \quad (2.35)$$

bezeichnet die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis B unter der Bedingung A .

Im stetigen Fall ist

$$f(x|y_0) = \frac{f(x, y_0)}{f(y_0)}, \quad (2.36)$$

falls $f(y_0) > 0$.

Häufig werden Bedingungen nicht explizit formuliert. Die Aussage: „Die Wahrscheinlichkeit, eine 6 zu würfeln, beträgt $\frac{1}{6}$ “ enthält zum Beispiel die Annahme, dass mit einem fairen Würfel gewürfelt wird. Die ausführliche Variante der obigen Umschreibung der bedingten Wahrscheinlichkeit lautet daher: „Die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis A ist p , falls das Ereignis B eintritt und alle weiteren Informationen irrelevant für A sind“ [Jen00, S. 12].

Für den Einfluss von Ereignis A auf Ereignis B gibt es drei Möglichkeiten:

1. $P(B) < P(B|A)$: Wenn A eintritt, ist B wahrscheinlicher (positiver Einfluss von A auf B)
2. $P(B) = P(B|A)$: A beeinflusst B nicht
3. $P(B) > P(B|A)$: Wenn A eintritt, ist B weniger wahrscheinlich (negativer Einfluss von A auf B)

Zwei Ereignisse heißen *unabhängig* genau dann wenn

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B). \quad (2.37)$$

Aus der Unabhängigkeit folgt unter anderem Fall 2 von oben:

$$\begin{aligned} P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) &\Leftrightarrow P(B) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)} = P(B|A) \\ &\Leftrightarrow P(A) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = P(A|B). \end{aligned}$$

2.6.7.1 Totale Wahrscheinlichkeit

Sei $\Omega = \bigcup_{i \in I} A_i$, I endlich oder abzählbar unendlich mit $A_i \cap A_j = \emptyset$ für $i \neq j$, $A_i \in \mathcal{A}(\Omega)$ und $P(A_i) \neq 0$. Dann gilt für alle $B \in \mathcal{A}(\Omega)$ [Bol98, S. 120]

$$P(B) = \sum_{i \in I} P(B|A_i) \cdot P(A_i). \quad (2.38)$$

2.6.7.2 Satz von Bayes

Für zwei Ereignisse A und B gilt

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (\text{Satz von Bayes}). \quad (2.39)$$

Der Satz folgt direkt aus der Definition der bedingten Wahrscheinlichkeit:

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{\frac{P(A \cap B)}{P(A)} \cdot P(A)}{P(B)} = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}.$$

Der Satz von Bayes lässt sich auch für endlich viele Ereignisse formulieren. Es gelten die Voraussetzungen aus Abschnitt 2.6.7.1. Außerdem sei $B \in \mathcal{A}(\Omega)$ ein Ereignis mit $P(B) \neq 0$. Dann gilt:

$$P(A_j|B) = \frac{P(B|A_j) \cdot P(A_j)}{\sum_{i \in I} P(B|A_i) \cdot P(A_i)} = \frac{P(B|A_j) \cdot P(A_j)}{P(B)} \quad (2.40)$$

für alle $j \in I$. $P(A_j|B)$ heißt *a-posteriori-Wahrscheinlichkeit*.

2.6.7.3 Bedingter Erwartungswert

Der *bedingte Erwartungswert* der diskreten Zufallsvariablen X gegeben $Y = y_0$ ist definiert als

$$E(X|Y = y_0) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i \cdot P(X = x_i|Y = y_0). \quad (2.41)$$

Im stetigen Fall ist der bedingte Erwartungswert definiert als

$$E(X|Y = y_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x|y_0) dx. \quad (2.42)$$

Bedingte Wahrscheinlichkeiten (bzw. Dichten) sind selber auch Wahrscheinlichkeiten. Ein bedingter Erwartungswert ist ein „gewöhnlicher“ Erwartungswert, bedingt auf das Ereignis, dass $Y = y_0$ ist. Durch Aufsummieren (bzw. Integrieren) über alle Ereignisse in Y kann wie bei der totalen Wahrscheinlichkeit wieder der unbedingte Erwartungswert von X berechnet werden.

3. Beschreibung von Risiken und Zielen

Die Grundlage für eine Analyse von Risiken bildet die Form, in der die Informationen beschrieben werden. Es gibt unterschiedliche Grade der Detaillierung und Formalisierung. Diese sollen hier als „qualitative“, „halbquantitative“ und „quantitative“ Beschreibung vorgestellt werden. Auch die Möglichkeiten zur Beschreibung von Zielen werden untersucht.

3.1 Qualitatives und halbquantitatives Risikomanagement

Ein zentraler Teil jedes Risikomanagement-Zyklus' ist die Risikobewertung bzw. -analyse [KK04, S. 31]. Die Analyse einzelner Risiken kann dabei sowohl die qualitative als auch die quantitative Bewertung einschließen. Zwei Beispiele für die Ausgestaltung des Risikomanagement-Prozesses werden in der Abbildung 3.1 dem derzeit bei der SAP verwendeten Prozess gegenübergestellt.

3.1.1 Aufteilung in Condition, Consequence, Indicator und Response

In der Riskit-Methode [Kon97] wird ein Risikoszenario als Kombination folgender *Risiko-elemente* beschrieben:

1. *Risikofaktor* (Risk factor): Bekannte Tatsache, die die Wahrscheinlichkeit eines Risikoereignisses beeinflusst und die Merkmale von dessen Umfeld beschreibt
2. *Risikoereignis* (Risk event): Ereignis mit negativen Auswirkungen
3. *Risikowirkung* (Risk outcome): Situation nach dem Risikoereignis, aber vor irgendeiner Reaktion
4. *Reaktion* (Reaction): Korrektive Maßnahme(n), die nach Eintritt eines Risikoereignisses ergriffen wird (werden)
5. *Risikoeffekt* (Risk effect): Netto-Auswirkung von Risikoereignis und Reaktionen auf die (Projekt-)Ziele
6. *Nutzenverlust* (Utility loss): Schaden, der einem Beteiligten durch eine Menge von Risikoeffekten in einer Situation entsteht

Der Zusammenhang zwischen diesen Elementen wird in Abbildung 3.2 dargestellt. Sowohl die Verwendung einer eingeführten Notation (nämlich der Unified Modeling Language UML) für die Darstellung der Zusammenhänge als auch die Grundüberlegung, ein Risiko durch mehrere Entitäten zu beschreiben, erscheinen sehr sinnvoll.

Kritisch anzumerken ist, dass die Beziehungen nicht vollständig bzw. teilweise auch zu ausführlich sind. Zum Beispiel die 1:1 Beziehung zwischen *Reaktion* und *Risikoeffekt* ist nicht ausreichend, um wie gefordert die Netto-Auswirkung eines Ereignisses zu bestimmen. Hier ist zumindest eine ternäre Assoziation von Risikowirkung, Reaktion und Risikoeffekt notwendig. Die Kardinalitäten zwischen Risikofaktor und Risikoereignis scheinen ungünstig gewählt; nach dem Diagramm gehört zu jedem Risikoereignis nur ein Risikofaktor (d. h. eine Ursache). Wenn der Aufwand betrieben wird, Risikofaktor, Risikoereignis und Risikowirkung durch separate Entitäten zu modellieren, dann sollte damit auch der häufig auftretende Fall abgebildet werden können, dass ein Verlustereignis mehrere Ursachen haben kann [KK04, S. 72].

Die oben genannten Elemente sind grundsätzlich auch im Risikomanagement-Modell der SAP vorhanden. Jedes *Inventarrisiko* wird im System ORM durch folgende Felder beschrieben (vgl. [SAP05]):

1. *Condition*: Ursache für das Risiko (entsprechend dem *Risikofaktor oben*)
2. *Indicator*: Tatsache, die Aufschluss über die Eintrittswahrscheinlichkeit gibt (entspricht ungefähr dem *Risikoereignis*)
3. *Consequence*: Mögliche Auswirkungen (entsprechend dem *Risikowirkung oben*)
4. *Responses*: Behandlung des Risikos (entsprechend der *Reaktion oben*, jedoch eher vorbeugend zu verstehen) durch eine oder mehrere der folgenden Optionen:
 - (a) *Delegate*: SAP-interne Abgabe
 - (b) *Research*: Sammlung von Informationen zur Entscheidungsunterstützung
 - (c) *Transfer*: Externe Abgabe, z. B. an Versicherungen
 - (d) *Accept*: Übernahme des Risikos, z. B. wenn andere Behandlungsmethoden weniger effizient sind; ggf. Vorhalten von Ressourcen, um Risiken tragen zu können
 - (e) *Mitigate*: Verminderung der potenziellen Schadenshöhe, Wahrscheinlichkeit oder Eintrittsdauer
 - (f) *Watch*: Überwachung des Risikos, um einen günstigen Zeitpunkt für die Risikobehandlung abzuwarten
5. *Impact bzw. Total Loss*: (Halb-)quantitative Beschreibung der Auswirkungen (entsprechend dem *Risikoeffekt*)
6. Die Nutzenbewertung, die oben im *Nutzenverlust* beschrieben wird, wird in der halbquantitativen Methode durch Schadensklassen mit ansteigender Schadenshöhe vorgenommen (vgl. 3.1.3)

3.1.2 Wahrscheinlichkeit und Schweregrad als halbquantitative Punktschätzung

In den meisten Fällen wird die textuelle Beschreibung von Risiken durch ihre Einordnung in Klassen bezüglich erwarteter Eintrittswahrscheinlichkeit („Probability“) und Schwere der Auswirkung („Impact“) ergänzt (das Verfahren wird auch „halbquantitativ“ genannt, vgl. [Mei05, S. 39-49]). Durch die Angabe von zwei Ordinalwerten kann das Risiko als Punkt in eine „P×I-Risikomatrix“ eingeordnet werden, aus der das „Risikoniveau“ (englisch: risk level) ablesbar ist (vgl. Tab. 3.3). Häufig werden die drei Risikostufen *niedrig, mittel und hoch* verwendet.

Bei der Klassenbildung geht sehr viel der ursprünglichen Information verloren. Dies soll an einem Beispiel verdeutlicht werden (Die Werte entstammen dem Modell der SAP [SAP05, S. 7]). Die halbquantitative Bewertung von Risiken erfolgt auf der globalen (unternehmenseinheitlichen) Ebene mit folgenden Klassen, jeweils für Wahrscheinlichkeit und Verlusthöhe:

<i>Verlusthöhe</i>	<i>Impactklasse</i>	<i>Qualitativ</i>
0-199 999 €	1	„insignificant“
200 000-999 999 €	2	„minor“
1 000 000-4 999 999 €	3	„moderate“
5 000 000-24 999 999 €	4	„major“
> 25 000 000 €	5	„catastrophic“

Tab. 3.1: Globale Impactklassen der SAP

<i>Wkt. P</i>	<i>Wahrscheinlichkeitsklasse</i>	<i>Qualitativ</i>
1-20 %	1	„remote“
21-40 %	2	„unlikely“
41-60 %	3	„likely“
61-80 %	4	„highly likely“
81-99 %	5	„near certainty“

Tab. 3.2: Wahrscheinlichkeitsklassen der SAP

Man beachte, dass die Verlusthöhenklassen nicht linear ansteigen. In der Praxis findet man auch Modelle, in denen die Eintrittswahrscheinlichkeiten nicht linear skaliert sind, sondern mit ansteigender Wahrscheinlichkeit ebenfalls größere Klassen gebildet werden (z. B. in der Methode der Deutschen Telekom AG [Deu05]).

Aus den möglichen Kombinationen von Eintrittswahrscheinlichkeit (Probability P) und Auswirkung (Impact I) ergibt sich die 5×5 -Risikomatrix mit den Risikoniveaus, die über die linke Hilfstabelle hergeleitet werden¹:

Die Annahmen, die in den auf diese Weise gebildeten Risikoniveaus stecken, sind nur schlecht nachvollziehbar. Insbesondere die lineare Skalierung der Wahrscheinlichkeit in Verbindung mit der nichtlinearen Skalierung der Verlusthöhen führt dazu, dass der erwartete Verlust nicht mehr durch das Risikoniveau widerspiegelt wird.

¹Für die höchste Verlustklasse 5 besteht bei der niedrigsten Wahrscheinlichkeitsklasse 1 eine Abweichung von der Regel. Obwohl $P \cdot I = 0,5$ ist, gilt dort ein mittleres Risikoniveau. Das kann mit den potenziell sehr hohen Verlusten in Verlustklasse 5 begründet werden.

		1	2	3	4	5	
$x = P \cdot I$	Risikoniveau	81-99 %	L	M	H	H	H
$0 < x < 1,1$	niedrig (L=Low)	61-80 %	L	M	M	H	H
$1,1 \leq x < 3,0$	mittel (M=Medium)	41-60 %	L	L	M	M	H
$x \geq 3,0$	hoch (H=High)	21-40 %	L	L	L	M	M
		1-20 %	L	L	L	L	M

Tab. 3.3: P×I-Matrix der SAP mit Risikoniveaus Low, Medium und High

3.1.3 Annahme einer Nutzenfunktion

Um die Verzerrungen, die mit einer nichtlinearen Skala einhergehen, zu verdeutlichen, vergleiche man die folgenden Beispielrisiken A und B:

Risiko	Wkt.	Klasse	Verlusthöhe	Klasse	Risikoniveau	Erw. Verlust
A	20 %	1	24 000 000 €	4	L	4 800 000 €
B	70 %	4	200 000 €	2	M	140 000 €

Risiko A erhält in dem Beispiel das Risikoniveau *niedrig (L)* und Risiko B das Niveau *mittel (M)*, obwohl der erwartete Verlust aus A mehr als 34 mal so hoch ist wie der erwartete Verlust aus B. Dieser Effekt lässt sich durch die Annahme einer konvexen Nutzenfunktion für die Verluste rechtfertigen, die durch die nichtlineare Einteilung der Verlustklassen zum Ausdruck gebracht wird. Anschaulich bedeutet das, dass jeder weitere Euro Verlust umso weniger „weh tut“, je größer der gesamte Verlust ist.

Diese Annahme entspricht durchaus der Erfahrung. Problematisch ist dabei aber, dass diese Annahme bei dem beschriebenen Vorgehen eher implizit bleibt². Ein Hindernis für eine Aggregation ist, dass auf den ordinalen Verlustklassen (von 1 bis 5) die Rechenarten Addition, Subtraktion oder Division nicht definiert sind [Gle04b, S. 353].

3.1.4 Aggregation halbquantitativer Werte

Um wieder zu Werten zu kommen, auf denen die Grundrechenarten definiert sind, sind zwei Arten der Umrechnung in Geldeinheiten denkbar. Entweder kann aus der halbquantitativen Verlustklasse eine stochastische Gleichverteilung über die möglichen Verlusthöhen abgeleitet werden, die als Minimum die untere Grenze der Verlusthöhe der jeweiligen Klasse und als Maximum die obere Grenze besitzt. Das entspricht der Annahme, dass bei Eintritt eines Verlustes jede Verlusthöhe innerhalb der Verlustklasse gleich wahrscheinlich ist. Diese stochastischen Verteilungen müssten dann mittels einer Monte Carlo Simulation aggregiert werden (vgl. dazu Abschnitt 4.3.2). Oder es wird ein Wert aus dem Intervall der Verlustklasse als Repräsentant der Klasse definiert und für die Aggregationsrechnungen verwendet. Hier bietet sich zunächst der Mittelwert aus oberer und unterer Grenze als Repräsentant an; in obiger Verlustklasse 2 wäre das beispielsweise der Wert $\frac{1\,000\,000+200\,000}{2} = 600\,000$. Eine Aggregation könnte dann auf der Grundlage der Erwartungswerte für die Verluste erfolgen

²Im „Project Management Body of Knowledge heißt es dazu [Pro04, S. 245]:

In using nonlinear scales, it is important to understand what is meant by the numbers and their relationship to each other, how they were derived, and the effect they may have on the different objectives of the project.

(Erwarteter Verlust = Repräsentant der Verlusthöhe \times Repräsentant der Eintrittswahrscheinlichkeit). Die addierten Erwartungswerte müssten dann erneut mit einer Nutzenfunktion bewertet werden, die zum Beispiel die Risikoniveaus „niedrig“, „mittel“ und „hoch“ zuordnet. Die Nachteile, die mit der ausschließlichen Betrachtung des *erwarteten* Verlusts einhergehen, wurden bereits in Abschnitt 4.2.1.2 erwähnt.

Die praktische Erfahrung aus Risk-Assessments [RAO05] zeigt aber, dass bei der Einstufung eines Risikos die korrespondierenden Schadenshöhen in Euro kaum bei der Bestimmung der Verlustklasse („Impact“) berücksichtigt werden. Nach Meier [Mei05, S. 40] besteht sogar explizit kein Zusammenhang zwischen Schadensklassen und Zahlenwerten. Unabhängig vom Verfahren zur Ableitung der Risikoniveaus zeigen sich deshalb die Grenzen des halbquantitativen Verfahrens, wenn mehrere halbquantitativ beschriebene Risiken aggregiert werden sollen. Ob die Ergebnisse einer solchen Aggregation noch als valide betrachtet werden, hängt auch vom gewünschten Genauigkeitsgrad ab, der wiederum eng mit den verfolgten Zielen der Aggregation verknüpft ist.

3.1.5 Response Cost

Die *Responses* können die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Risikoereignisses und/oder die Verlusthöhe verringern. Pro Risiko können mehrere Responses getroffen werden. Häufig sind die Behandlungsmaßnahmen für Risiko ebenfalls mit Kosten verbunden (z. B. als Personalkosten, Beratungskosten, Versicherungsprämien oder für Sicherheitsmaßnahmen, Notfallplanung etc.). Der Nettoeffekt einer Maßnahme lässt sich als erwartete Verringerung des Verlusts abzüglich Risikobehandlungskosten berechnen.

Ein Risiko muss nicht erst eintreten, um Gegenmaßnahmen zu treffen. Der günstigste Zeitpunkt für eine Risikobehandlung ist meist vor Eintritt eines Verlusts. Bei der Eingabe von Responses ist zu beachten, dass zeitliche Bezüge des Eintritts nicht explizit durch mehrere „Zeitscheiben“ modelliert werden (vgl. dazu die folgenden zwei Abschnitte). In einem *kausalen* Modell impliziert das Konzept der Kausalität jedoch immer, dass die Wirkung nach der Ursache eintritt.

3.1.6 Timeframe

Für jedes Risiko existiert ein optionales Feld *Timeframe*, das nur für die Bewertung der Dringlichkeit der Behandlungsmaßnahmen genutzt wird. Es gibt an, innerhalb welcher Zeitspanne Behandlungsmaßnahmen getroffen werden müssen. Es kann die Ausprägungen „kurzfristig“ (0-3 Monate), „mittelfristig“ (3-12 Monate) oder „langfristig“ (über ein Jahr) annehmen.

3.1.7 Weitere zeitliche Bezüge der halbquantitativen Methode

Wie bereits beschrieben spielt die Zeit in zwei anderen Zusammenhängen eine Rolle:

1. Bei der Quantifizierung von Risiken muss ein betrachteter Zeitraum vorgegeben werden, anhand dessen Eintrittswahrscheinlichkeiten und kumulierte Verluste geschätzt werden (vgl. dazu Abschnitt 4.2.2.1). Dieser Zeitraum beträgt meistens ein Jahr oder, wie bei der SAP AG, drei Jahre.

2. Bei der Quantifizierung eines Risikos kann auch eine Schätzung der zeitlichen Entwicklung der Risikogrößen erfolgen. Damit kann beschrieben werden, ob ein zeitlich gestaffelter Eintritt des Risikos in unterschiedlichen Perioden erwartet wird. Dazu müssen „Zeitscheiben“ gebildet werden, für die das Risiko jeweils separat geschätzt wird; damit steigt auch der Aufwand für die Datengewinnung und -aktualisierung sowie ggf. auch für die Modellierung von Abhängigkeiten.

Beide zeitliche Zusammenhänge sind als unabhängig von dem Feld *Timeframe* zu sehen. Der Referenzzeitraum (Punkt 1) muss als grundlegende Annahme auch bei der halbquantitativen Methode in die Schätzung eingehen. Für die Eintrittswahrscheinlichkeit ist der Zusammenhang direkt ersichtlich (z. B. muss bei einem Zeithorizont von 3 Jahren eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 10 % angegeben werden, wenn das betrachtete Risiko im Durchschnitt einmal in 30 Jahren eintritt). Für den Schweregrad des Verlusts wird wieder eine Umrechnung in Euro über die globale Verlustmatrix vorgenommen. Die zu einer Verlustklasse gehörigen Zahlenwerte müssen wie bei der quantitativen Methode als Bereich der voraussichtlichen kumulierten Verlusthöhe innerhalb des Betrachtungszeitraums interpretiert werden, so dass auch hier die zeitliche Komponente als Maßstab eingeht.

In einem Risk Assessment durch Experten spielt in der Praxis der zeitliche Bezug der Verluste kaum eine Rolle. Um das zu verbessern, sollte zu Beginn eines Risk Assessments eine Erklärung des Wahrscheinlichkeitsbegriffs mit Hilfe des frequentistischen Ansatzes („alle wieviel Jahre kann der Eintritt des Ereignisses erwartet werden?“) und die explizite Erwähnung des Zeitraums, der einer Schätzung zugrunde gelegt werden soll, erfolgen.

Wegen des hohen Aufwands und der geringeren Übersichtlichkeit der Ergebnisse, der mit der Bildung von „Zeitscheiben“ wie in 2 beschrieben einhergeht, erscheint diese Verfeinerung für die SAP AG auch zukünftig nicht empfehlenswert.

3.2 Quantitatives Risikomanagement

Sobald die Auswirkung eines Risikos nicht mehr nur durch weiche Kategorien wie „unbedeutend“, „moderat“ oder „katastrophal“, sondern durch Zahlen beschrieben wird, ist es quantifiziert. Die Zahl muss nicht notwendigerweise eine Geldeinheit haben; Risikowirkungen können zum Beispiel auch durch (Projekt-)Tage, Fehlerraten oder Kundenzufriedenheitswerte quantifiziert werden.

Die Beschreibung der Verluste durch eine Zahl oder eine stochastische Verteilung (als Beschreibung mehrerer möglicher, jedoch unsicherer Risikowirkungen) ist eine notwendige Voraussetzung für eine mathematische Aggregation von Risiken. Eine weitere Voraussetzung ist das Vorliegen der Zahlenwerte in einer gemeinsamen Maßeinheit in der das Gesamtrisiko letztlich angegeben wird, oder die Umrechenbarkeit der Zahlenwerte in diese Einheit. Typischerweise wird für diese Einheit ein Wert verwendet, der sich aus der Gewinn- und Verlustrechnung des Unternehmens (GuV) herleiten lässt. Das kann zum Beispiel der EBITDA³ sein, der sich aus der Summe von Betriebsergebnis (aus der GuV), Nettozinszahlungen und Abschreibungen ergibt.

³„Earnings Before Interest, Tax, Depreciation and Amortization“, zu deutsch *Gewinn vor Zinsen, Steuern und Abschreibungen*

3.3 Zielorientierung

Risiken existieren nie ohne eine Beziehung zu Zielen, Erwartungen oder Einschränkungen [Kon97, S. 19]. Die isolierte Betrachtung von Risiken ohne einen Bezugspunkt ist immer von begrenztem Nutzen für das Management; es ist von größerem Interesse, welche Ziele durch die Risiken bedroht sind. Durch die Einbeziehung der Geschäftsziele in den Risikomanagementprozess soll der Nutzen der Risikoinformationen für Managementzwecke gesteigert werden, was zu einer erhöhten Akzeptanz für das Risikomanagement führt.

3.3.1 Hierarchische Zieldefinition

Der Prozess der Vorgabe von Zielen beinhaltet eine zunehmende Konkretisierung der durch die Unternehmensführung vorgegebenen abstrakten Ziele auf den darunterliegenden Ebenen [Mei05, S. 155]. Auf der Unternehmensebene werden grundsätzliche, *normative* Ziele und Unternehmenswerte festgelegt, durch die auch der generelle Umgang mit Risiken vorgegeben wird. Auf der darunterliegenden Ebene werden die normativen Ziele zu *strategischen* Zielen konkretisiert. Eine weitere Konkretisierung der strategischen Ziele erfolgt auf der *operativen* Ebene, auf der konkrete Zielmarken vorgegeben werden, die innerhalb einer überschaubaren Zeit erreichbar sind. Als letzter Schritt kann noch die Verbindung der *individuellen* Zielvereinbarungen der Mitarbeiter mit den operativen Zielen ihrer Einheit erfolgen.

Ein Beispiel mit vier hierarchischen Zielen könnte wie folgt aussehen:

<i>Ebene</i>	<i>Ziel</i>	<i>Art</i>
Board Area	Umsatzsteigerung um x %	normativ
Executive Board	Marktführerschaft im Bereich XY	strategisch
Business Unit	Fertigstellen der Lösung Z bis zum Datum X	operativ
Individuell	Erstellen einer lauffähigen Funktion F	individuell

3.3.2 Der Zielplanungsprozess der SAP

Bei der SAP AG existiert ein kaskadierender Zielsetzungsprozess, der die Unternehmensziele und -werte über die Organisationshierarchie bis zu den operativen Zielen der einzelnen Geschäftseinheiten herunterbricht.

3.3.3 Arten von Zielvorgaben

In der RiskIT-Methode werden drei Arten unterschieden, wie Ziele vorgegeben werden können [Kon97, S. 20]:

- Als *Richtwert*: Ein Ziel mit wohldefiniertem Maß der Erreichung. Beispiel: „Fahre innerhalb einer Stunde von A nach B“,
- als *Treiber*: Ein Ziel mit definierter Richtung, aber ohne feste Zielmarke, an der entschieden wird, ob das Ziel erreicht wurde. Beispiel: „Verringere die Zahl der Kundenbeschwerden“ und
- als *Einschränkung*: Ein negativ formuliertes Ziel. Beispiel: „Steigere den Marktanteil, ohne das Kartellrecht zu verletzen“

Eine Kombination der drei Zielarten ist auch denkbar, zum Beispiel: „Fahre in höchstens einer Stunde unfallfrei von A nach B.“. Bei dieser Beschreibung kann nach einer Stunde gemessen werden, ob das Ziel erreicht wurde. Es ist eine Richtung angegeben (je schneller, desto besser), und es wird eine Bedingung formuliert (nämlich unfallfrei zu fahren).

3.3.4 Integration von Zielen in den Risikomanagementprozess

Geschäftsziele sind hilfreich als Ausgangspunkt der Risikoidentifikation. Wenn bestimmte Ziele bei der Risikoidentifikation unberücksichtigt bleiben, besteht die Gefahr, dass die mit diesen impliziten Zielen zusammenhängenden Risiken ebenfalls unerkannt oder zumindest unausgesprochen bleiben [Kon97, S. 19]. Deshalb sollte die explizite Formulierung der Geschäftsziele den Ausgangspunkt einer Risikobewertungssitzung bilden. Eventuell muss der Prozess der Ziel- und der Risikodefinition iterativ durchgeführt werden, wenn korrespondierende Ziele erst identifiziert werden, während über die sie bedrohenden Risiken gesprochen wird. Damit leistet das Risikomanagement einen Beitrag zur besseren Definition der Geschäftsziele. Es ist auch denkbar, dass ursprünglich genannte Risiken als nicht relevant bewertet werden, wenn festgestellt wird, dass sie keines der eigenen Ziele bedrohen. Kurz gesagt: Ein Risiko, das keines der eigenen Geschäftsziele bedroht, ist entweder kein relevantes Risiko, oder die Zieldefinition ist unvollständig.

Langfristig erscheint eine enge Verzahnung des Risikomanagementprozesses mit dem Zielsetzungsprozess als sinnvoll, weil sich wie beschrieben beide Prozesse gegenseitige Eingaben liefern. Idealerweise sollte eine fortlaufende, iterative Identifikation von Zielen und Risiken erfolgen, was aber eine enge Integration der beiden Prozesse notwendig macht, die derzeit nicht realistisch erscheint. Eine zu enge Verzahnung kann aber auch eine Gefahr für den derzeitigen Risikomanagementprozess sein, wenn eine zu große einseitige Abhängigkeit vom Zielsetzungsprozess ohne Möglichkeit der Einflussnahme besteht. In der Theorie kann es zwar kein Risiko ohne Ziel geben, in der Praxis sollte das Risikomanagement aber auch mit „ad hoc“ erstellten Zielen funktionieren können. Es ist immer denkbar, dass Uneinigkeit oder Unklarheit über die gemeinsamen Ziele oder ein zu langsamer Zielsetzungsprozess zu einer zum Zeitpunkt der Risikoanalyse unzureichenden expliziten Festlegung aller Ziele führt. Wenn deshalb erkannte Risiken nicht beschrieben werden können, wirkt die Integration der Ziele nicht mehr im Sinne eines ganzheitlichen Risikomanagements.

3.3.5 Quantifizierung der Ziele

Die Quantifizierung einer positiven Plangröße, gegen die eine mögliche negative Abweichung gemessen werden kann, ist eine notwendige Voraussetzung für eine sinnvolle Aussage über die Risikohöhe. Den monetären Wert eines Ziels, einer Initiative oder einer Geschäftseinheit innerhalb eines Unternehmens realistisch zu bewerten, ist allerdings in vielen Fällen nicht möglich. Gerade in Softwareunternehmen liegen zunächst wenige finanzielle Kenngrößen vor, die für die Bewertung zum Beispiel von Entwicklungsleistungen brauchbar sind. Häufiger anzutreffende Maßeinheiten sind zum Beispiel Personentage, Fehlerhäufigkeiten oder das Liefern bestimmter Funktionalitäten.

Es muss auch unterschieden werden, ob eine Entwicklung für interne oder externe Kunden erfolgt. Bei externen Kunden ergeben sich viele Ziele direkt aus den Verträgen oder sind aus den Vertragspflichten ableitbar. Für interne Kunden ist eine exakte Fixierung von Anforderungen und Zielerreichung teilweise nicht effizient, weil die geringere Flexibilität und der höhere Verwaltungsaufwand solcher Vereinbarungen einen zusätzlichen Aufwand bedeuten, der der im Softwarebereich immer häufiger geforderten Agilität (die auch einer der Unternehmenswerte der SAP AG ist) zuwiderläuft.

Soll der Grad der Bedrohung eines Ziels durch die erfassten Risiken quantitativ beschrieben werden, muss dem Ziel eine Kennzahl für die Zielerreichung (sog. „Key Performance

Indicator“, KPI) zugeordnet sein. Zusätzlich müssen sowohl Risiko als auch Ziel in der gleichen Einheit gemessen werden. Damit wird eine Bewertung von Risiken nach anderen als nach monetären Größen notwendig. Grundsätzlich muss auch der Zeithorizont, nach dem die KPI bewertet werden, mit dem Zeithorizont der Risikoschätzung kompatibel gemacht werden.

3.4 Künftige Zielsetzung des Risikomanagements

Wie bereits in Abschnitt 2.2 ausgeführt, gibt es viele mögliche Zielsetzungen für ein Risikomanagement. Als Voraussetzung für die genauere Beschreibung von Risiken muss daher zuerst geklärt sein, welches Ergebnis mit den Daten erreicht werden soll.

Die SAP beabsichtigt mit ihrem Risikomanagement, die Sensibilität für Risiken dort zu erhöhen, wo sie eingegangen werden, sowie den gesetzlichen Anforderungen an die Berichterstattung an Vorstand, Aufsichtsrat und Kapitalmärkte gerecht zu werden. Erst die Nutzung der Risikoinformationen zu Zwecken der strategischen Unternehmenssteuerung, zur Kalkulation von Preisen oder zur Erfolgsmessung der Geschäftseinheiten kann dabei aber einen echten Mehrwert für das Geschäft generieren. Eine Weiterentwicklung der Methodik im Risikomanagement in Richtung einer besseren Unterstützung der Unternehmensplanung wird deshalb grundsätzlich angestrebt.

Ein stärker „wertorientierter“ Ansatz wird derzeit vor allem in Banken und Versicherungen verfolgt, z. B. durch Berechnung eines RORAC (Return on Risk Adjusted Capital) oder RAROC (Risk Adjusted Return on Capital)⁴. Der Grund dafür ist die bessere Quantifizierbarkeit der dort eingegangenen Risiken: Markt- und Kreditrisiko lassen sich aufgrund großer verfügbarer Datenmengen relativ gut mit statistischen Methoden schätzen, und in Versicherungen ist die Quantifizierung der abgesicherten Risiken das Fundament der Produktkalkulation.

Im Bereich der operationellen Risiken sind aber auch Finanzdienstleister mit den gleichen Schwierigkeiten konfrontiert, weshalb sich noch kein Standard für die umfassende Quantifizierung aller operationellen Risiken durchgesetzt hat. Gerade die Möglichkeit, die eigenen Erfolgskennzahlen durch die Höhe des selbst geschätzten Risikos beeinflussen zu können, erfordert eine ständige Kontrolle der gemeldeten Risikoinformationen.

⁴RORAC und RAROC sind einfache risikoadjustierte Erfolgskennzahlen aus dem Banken- und Versicherungsbereich. Der RORAC setzt den Ertrag eines Geschäftsbereichs ins Verhältnis zum Risiko [Hol04, S. 33]:

$$RORAC = \frac{Return}{Risk - AdjustedCapital} = \frac{Nettoergebnis}{VaR}$$

Der RAROC nimmt einen Risikoabschlag vom Nettoergebnis vor und kann z. B. wie folgt definiert werden [Zin01, S. 511]:

$$\frac{Erlös - Kosten - Erwarteter Verlust + Einkommen aus Kapital}{Ökonomisches Kapital},$$

wobei der erwartete Verlust dem Mittelwert aus der Verlusthöhenverteilung entspricht⁵). Statt mit Eigenkapital wird mit „ökonomischem Kapital“ gerechnet, das nicht den buchhalterische Einschränkungen der Eigenkapitalermittlung unterliegt und deshalb für interne Berechnungen besser geeignet ist [Kai04, S. 27]. Das „Einkommen aus Kapital“ entspricht dem risikolosen Zins des zugeordneten Kapitals; es wird den Erträgen hinzugerechnet, weil dieses Kapital an anderer Stelle vorgehalten wird, um mögliche Verluste zu tragen, und dort zumindest zum risikolosen Zins Erträge erwirtschaften kann.

4. Methoden der Aggregation

Unter einer Aggregation von Daten versteht man das Zusammenfassen von detaillierten Daten zu größeren Einheiten. Obwohl das lateinische Wort „aggregare“ mit „beigesellen“, „anhäufen“ übersetzt wird, ist im Zusammenhang mit Risiken mit einer Aggregation mehr gemeint als das bloße Zusammensammeln gleichartiger Risiken. Eine Aggregation umfasst immer auch die Bildung neuer, generalisierter Einheiten, die das Wesentliche der enthaltenen Risikoinformationen transportieren. Damit ist Risikoaggregation eine Informationsverdichtung mit dem Ziel, aus einer Menge von Einzelrisiken einen möglichst ausgewogenen und für den Adressaten aussagekräftigen Überblick über die Risikolage eines Bereichs zu bieten.

Daraus folgt, dass eine Risikoaggregation auch rein qualitativ (auf der Basis von Text) erfolgen kann. Dazu können entlang einer definierten Berichtslinie zu definierten Zeitpunkten Risikoberichte erstellt werden, die auf der jeweils höheren Ebene mit weiteren Risikoberichten erneut zusammengefasst werden. Eine solche Aggregation ist nicht nur arbeits- und zeitintensiv, was der Aktualität der letztendlich enthaltenen Informationen schadet, sondern sie beruht im Wesentlichen auf subjektiven Entscheidungen über die Wichtigkeit der einzelnen Risiken durch die Verfasser der Risikoberichte. Im besten Fall erfolgt diese Entscheidung neutral, es besteht jedoch bei jeder Zusammenfassung die Gefahr, dass bestimmte Risiken aus politischen Gründen kleiner oder größer dargestellt werden, als das ihrem tatsächlichen Ausmaß entspricht. Zusätzlich besteht das Risiko von Fehlinterpretationen, wenn auf einer höheren Ebene nicht alle Hintergründe eines Risikos bekannt sind. Generell steigt das Risiko von Fehlern, je weniger eindeutig und formal das „Protokoll“ für eine Informationsübermittlung ist.

Als Abhilfe bietet sich die *zusätzliche* halbquantitative bzw. quantitative Beschreibung von Risiken an, die wegen der vermeintlichen Objektivität von Zahlen eine neutralere Sicht auf die Risiken versprechen. Gleichzeitig besteht die Hoffnung, dass durch die automatisierte Berechnung des Gesamtrisikos der Arbeits- und Zeitaufwand für die Aggregation gesenkt und die Qualität der Berichte erhöht werden kann.

In diesem Kapitel sollen die Methoden erläutert werden, die die Grundlage für eine Aggregation bilden. Konkret werden Fragen im Zusammenhang mit dem *Strukturieren*, *Messen* und *Zusammenrechnen* von Risiken behandelt.

4.1 Klassifizierung der Risiken

Sowohl für die qualitative als auch für die quantitative Aggregation von Risiken wird als Grundlage zunächst eine Struktur benötigt, anhand derer die Risiken kategorisiert werden [KK04, S. 69]. Diese Struktur gibt gleichzeitig die gesuchten Aggregate vor [KK04, S.123]. Die „klassische“ Struktur ist eine Matrix aus Unternehmensbereichen und Risikokategorien¹. In der Grundidee der fortgeschrittenen Messansätze für operationelle Risiken im Bankbereich wird für jede Zelle der Matrix eine aggregierte Gesamtverteilung und daraus ein Value at Risk (oder ein anderes geeignetes Risikomaß) bestimmt (s. Tabelle 4.1).

		1: HR	2: Projects	3: Finance	j: ...	Total
1	Research and Breakthrough Innovation	VaR_{11}	VaR_{12}	VaR_{13}	VaR_{1j}	$VaR_{1\bullet}$
2	Product	VaR_{21}	VaR_{22}	VaR_{23}	VaR_{2j}	$VaR_{2\bullet}$
3	Production	VaR_{31}	VaR_{32}	VaR_{33}	VaR_{3j}	$VaR_{3\bullet}$
4	Service and Support	VaR_{41}	VaR_{42}	VaR_{43}	VaR_{4j}	$VaR_{4\bullet}$
5	Customer Solutions and Operations	VaR_{51}	VaR_{52}	VaR_{53}	VaR_{5j}	$VaR_{5\bullet}$
6	Finance and Administration	VaR_{61}	VaR_{62}	VaR_{63}	VaR_{6j}	$VaR_{6\bullet}$
7	Human Resources and Processes	VaR_{71}	VaR_{72}	VaR_{73}	VaR_{7j}	$VaR_{7\bullet}$
	SAP AG	$VaR_{\bullet 1}$	$VaR_{\bullet 2}$	$VaR_{\bullet 3}$	$VaR_{\bullet 4}$	VaR_{total}

Tab. 4.1: Auf die SAP angepasste „Risikomatrix“

Die gezeigte Matrix ist eine Übertragung der allgemeinen Darstellung aus dem Bankbereich auf die Verhältnisse bei der SAP AG. Die Unternehmensbereiche entsprechen den sieben Vorstandsbereichen („Board Areas“) der SAP [SAP04, S. 2–4], und die ange-deuteten Risikotreiber (bzw. „Risikokategorien“) entstammen den derzeit verwendeten „Common Risks“ aus der Risikomanagement-Methodik der SAP. Im Bankbereich sind die Risikokategorien von der Bankenaufsicht vorgegeben [Bas04, Anhang 7].

4.1.1 Klassifizierung nach der Organisationsstruktur

Die Bildung von Kategorien ist jedoch in Wirklichkeit komplexer als in einer solchen Darstellung. Die Vorstandsbereiche müssen noch in ihre enthaltenen Geschäftseinheiten aufgegliedert werden, wenn eine Berichterstattung über Risiken auf der Ebene der Geschäftseinheiten möglich sein soll. Auch innerhalb eines Vorstandsbereichs ist eine Aufgliederung nach Geschäftseinheiten für die weitere Analyse der aggregierten Risiken

¹Diese Matrix entstammt dem Baseler Akkord, der Risiken in eine vorgegebene Matrix von 8 Geschäftsbereichen und 7 Risikokategorien einordnet [Bas04, Anhang 7]. Dort ist generell von „Risikokategorien“ die Rede, jedoch sollte berücksichtigt werden, dass es unterschiedliche Arten gibt, Risiken zu kategorisieren. Denkbar ist zum Beispiel eine Einordnung nach der Quelle des Risikos oder nach den betroffenen Produkten, Kunden, Systemen, Wettbewerbern etc. Weil in diesem Zusammenhang die Quellen des Risikos gemeint sind, wird von den Basel-II-Kategorien als „Risikotreibern“ gesprochen, wenn eine Unterscheidung notwendig ist.

notwendig. Diese Aufgliederung ist relativ einfach zu erhalten, weil sich eine überschneidungsfreie Zuordnung der Risiken aus dem baumartigen Aufbau des Unternehmensorganigramms ergibt².

Die Einteilung der Risiken nach der Organisationshierarchie wird manchmal als unzulänglich für horizontale Prozesse, die mehrere Geschäftseinheiten betreffen, betrachtet. Beispielsweise im Produktlebenszyklus einer Anwendung berührt diese fast alle Bereiche des Unternehmens, vom Marketing über die Entwicklung und den Vertrieb bis zum Support und ggf. auch Hosting. Erfahrungsgemäß existieren gerade an den Schnittstellen, an denen das Produkt in einen anderen Bereich übergeben wird, große Risiken. Betrachten wir beispielhaft das Risiko, dass bei einer Anwendung Performanceprobleme auftreten können. Das Risiko entsteht bereits bei der Entwicklung (Geschäftseinheit E), führt aber erst beim Vertrieb (Geschäftseinheit V) zu einem möglichen Verlust durch Umsatzeinbußen. Wird nun ein optimales Risikomanagement betrieben, wird V durch E über das Risiko informiert und nimmt gemeinsam mit E eine Risikoschätzung vor, die das Risiko von V erhöht. Es sei in dem Beispiel in diesem Stadium eine effektive Risikominderung nur bei E möglich. Die aggregierte Information auf der übergeordneten Ebene würde nun jedoch nur widerspiegeln, dass das Risiko von V sich erhöht hat. Um sinnvolle Steuerungsinformationen (zum Beispiel über den Einsatz zusätzlicher Ressourcen) zu erhalten, müssten aber statt der aggregierten Information wieder die Einzelrisiken von V betrachtet werden, aus denen hervorgeht, dass Maßnahmen zur Risikominderung bei E ansetzen müssen. Ein weiterer Schwachpunkt liegt in der notwendigen Information von V durch E, ohne die das Risiko nicht rechtzeitig erkannt wird.

Dennoch gibt es keine bessere Alternative zur Einteilung der Risiken nach der Organisationsstruktur. Unternehmen werden nicht rein prozessorientiert bzw. nach Marktmechanismen gesteuert, sondern Verantwortlichkeiten werden nach Bereichen bzw. Geschäftseinheiten abgegrenzt und hierarchisch geordnet³. Um die Risikoinformationen mit den Planungsprozessen des Unternehmens in Einklang bringen zu können, sollten sie in der gleichen (ggf. wie oben erwähnt vereinfachten) Struktur organisiert werden.

4.1.1.1 Bereichsübergreifendes Denken

Als Gegenentwurf zu dem kritisierten „Silodenken“ bietet sich die gemeinsame Bewertung von Risiken durch mehrere Organisationseinheiten an. Dies wird bei der SAP in gemeinschaftlichen Risikobewertungssitzungen („Collaborative risk assessments“) praktiziert, bei denen mehrere Teilhaber einer Risikosituation zu einer gemeinsamen Bewertung kommen. Die Ablage der so bewerteten Risiken im System *Operational Risk Management (ORM)* erfolgt dennoch entsprechend der Organisationshierarchie, aber mit Hilfe von Verweisrisiken („Linked Risk“). In dem obigen Beispiel eines bereichsübergreifenden Prozesses müsste demnach E der Risikoeigner⁴ sein. Die Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit muss durch E erfolgen, weil nur E über ausreichende Informationen über

²Für den Einsatz in der Praxis hat sich eine Vereinfachung des Organigramms aus dem Personalbereich, das ca. 10 000 Knoten enthält, zu einer übersichtlicheren Struktur als hilfreich erwiesen und wird derzeit umgesetzt.

³Interessante Erklärungen dieser Ansätze finden sich in der Neuen Institutionenökonomik, die auf den Gedanken aus [Coa37] aufbaut.

⁴Ein wichtiger und zentraler Teil des Risikomanagement-Ansatzes der SAP ist das Konzept des „Risikoeigners“ („Risk Owner“). Der Risikoeigner ist in der Regel nicht notwendigerweise der Urheber des Risikos, sondern derjenige, der sich um die Maßnahmen zur Risikobehandlung kümmert. Als Risikoeigner soll die Person geführt werden, die die besten Möglichkeiten der Risikobehandlung besitzt.

die Entstehung des Risikos haben kann. Die eigene Schadenshöhe bei E ist nach der Beispiellannahme gleich 0. V schätzt nun seine Verlusthöhe für den Fall, dass das Risiko eintritt, und erstellt ein Verweisrisiko in dieser Höhe, das auf das von V angelegte originäre Risiko verweist. Bei der Risikoaggregation muss das Verweisrisiko V zugerechnet werden, wobei die Eintrittswahrscheinlichkeit des bei E abgelegten Risikos verwendet wird. Risikobehandlungsmaßnahmen („Responses“) können sowohl bei dem originären Risiko (durch E) erfolgen, um die Eintrittswahrscheinlichkeit zu beeinflussen, als auch bei dem Verweisrisiko, um die Verlusthöhe (durch V) zu senken.

4.1.2 Klassifizierung nach Risikokategorien

Die Value at Risk-Variablen in Tabelle 4.1 sind als Beispiel für eine zu berichtende aggregierte Risikoinformation zu sehen. Je nach Risikomanagement-Methodik kann die gleiche Struktur auch dazu dienen, andere Risikomaße und/oder eine qualitative Beschreibung als Text für jeden Teilbereich anzugeben. Die Brauchbarkeit der aggregierten Informationen ist entscheidend von einer Struktur abhängig, die im Hinblick auf die durch das Risikomanagement zu beantwortenden Fragen gebildet wurde. Daraus folgt wiederum, dass zunächst die Zielsetzungen des unternehmensweiten Risikomanagements festgelegt werden müssen, bevor alternative Datenstrukturen bewertet werden können. Diese Festlegung ist Teil der Risikopolitik des Unternehmens und kann nicht im Rahmen dieser Arbeit getroffen werden.

Die Kategorisierung kann entweder zentral vorgegeben werden („Top Down“) oder durch den Vergleich der bestehenden Risiken und Herausfiltern von Gemeinsamkeiten („Bottom Up“) erfolgen. Bei der „Top Down“-Kategorisierung besteht die Gefahr, dass tatsächliche Risiken nicht in die vorgegebenen Kategorien passen, weil diese bei der Kategorienbildung nicht berücksichtigt wurden. Bei der „Bottom Up“-Kategorisierung besteht die Gefahr eines unkontrollierten „Wildwuchses“ von Aggregationskategorien, die nicht im Hinblick auf die zentralen Fragestellungen gebildet werden.

Als Beispiel, an dem die Bedeutung der Bildung von Risikokategorien deutlich wird, kann die Frage nach den größten Risiken durch einen beliebigen Mitbewerber dienen. Werden die Risiken ausschließlich nach ihren Risikotreibern kategorisiert, kann sich diese Information zu Teilen in der Kategorie „Marktrisiken“, zu Teilen unter „Strategische Positionierung“ und zu Teilen unter „Wettbewerbsbeobachtung“ (sowie weiteren Kategorien) verbergen. Damit ist die gewählte Kategorisierung für die Beispielfrage unbrauchbar.

Die Frage nach den „größten Risiken“ lässt sich auch beantworten, wenn eine Zuordnung der Risiken zu bestimmten Kennzeichen (n Risiken zu m Kennzeichen) erfolgt. Damit würde eine alternative Möglichkeit der Kategorisierung von Risiken geschaffen, die jedoch keine Vollständigkeit oder Überschneidungsfreiheit sicherstellt. Die Herausforderung liegt darin, festzulegen, welche Kategorien benötigt werden, und für welche zusätzlichen Kennzeichen es sich lohnt, diese bei der Eingabe von Risiken abzufragen.

Empfehlenswert erscheint die zentrale Vorgabe weniger, stabiler Kategorien, die zum Vergleich der aggregierten Risiken herangezogen werden können. Parallel sollte ein Kennzeichensystem bereitgestellt werden, das die ad hoc-Filterung von Teilmengen von Risiken nach anderen Kriterien ermöglicht. Für die Anpassung der Kennzeichen wird ein flexibler Prozess benötigt, der auch die Anpassung an sich ändernde Unternehmensbedingungen ermöglicht.

Auch für eine Sammlung von Verlustereignisdaten (vgl. 5.3) ist die Klassifizierung der Schadensfälle eine Voraussetzung. Historische Schadensfälle können als Grundlage für

<i>Deutsche Übersetzung</i>	<i>Englischer Originalname</i>
Wirtschaftliche Risiken	Economic Risks
Zielmarktrisiken	Market Risks
Strategische Risiken	Strategic Focus
Finanzielle Risiken	Financial Risks
Personalrisiken	Human Capital
Organisations-/Unternehmensführungsrisiken	Organization and Governance
Projektrisiken	Project Risks
Produkttrisiken	Product Risks
Informationsrisiken	Communication and Information
Sonstige Betriebsrisiken	Other Operational Risks

Tab. 4.2: Hauptkategorien der „Common Risks“

eine Objektivierung von Risikoschätzungen, als Hilfestellung bei der Risikoidentifikation oder, bei ausreichender Datenmenge, für statistische Schätzmethoden verwendet werden. Dazu müssen gleichartige Ereignisse identifiziert werden. Die Kennzeichen und Klassifizierungen der Risiken können hier ebenfalls verwendet werden, um eine Vorauswahl in Betracht kommender Schadensfälle zu treffen.

4.1.2.1 Die „Common Risks“ der SAP AG

Im derzeitigen Risikomanagement-Rahmen der SAP AG sind „Common Risks“ als Risikokategorien definiert. Die Kategorien wurden in einem „Top Down“-Prozess vorgegeben und sind daher nicht ohne Weiteres anpassbar, um flexibel auf neue Fragestellungen zu reagieren. Die derzeit definierten Hauptkategorien sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Zu diesen Hauptkategorien existieren in einer mehrstufigen Hierarchie weitere Unterkategorien. Zum Beispiel gibt es in der Kategorie „Sonstige Betriebsrisiken“ die Unterkategorie „Infrastruktur“, darunter die Unterkategorie „Gebäude“ und darunter wiederum die Kategorie „Planung und Bau“. Jedes Risiko als Kombination aus Ursache („Condition“) und Auswirkung („Consequence“) kann im System *ORM* genau einem Common Risk auf der untersten Detaillierungsebene zugeordnet werden; eine direkte Zuordnung eines Risikos zur Kategorie „Gebäude“ ist zum Beispiel nicht möglich. Dadurch ergibt sich das Problem, einen einheitlichen Detaillierungsgrad zu finden, der für *alle* Risiken angemessen ist. Wie bereits erwähnt gibt es bei diesen Kategorien grundsätzlich Schnittmengen, die eine eindeutige Zuordnung eines Risikos unmöglich machen. Wegen dieser Schwierigkeiten wird derzeit eine Reduzierung auf die oben genannten Hauptkategorien und/oder ein anderer Zuschnitt der Kategorien in Erwägung gezogen. Ein möglicherweise erfolgversprechender Ausweg ist die Definition der bestehenden Zuordnung der Risiken als Hauptkategorie (für die Einordnung zum Beispiel bei der Aggregation) und die Einrichtung weiterer Merkmale, die zum Filtern der Risiken verwendet werden können.

4.2 Risikomaße

Um mehrere Risiken aggregiert darstellen und vergleichen zu können ist es notwendig, ein gemeinsames Risikomaß zu finden. Diese Kennzahl soll es ermöglichen, das Gesamtrisiko von Teilmengen der Unternehmensrisiken vergleichbar zu machen, nachdem ihre Gesamtschadensverteilung gebildet wurde (s. dazu den folgenden Abschnitt 4.3).

4.2.1 Erwarteter Verlust als Risikomaß

Die einfachste Möglichkeit zur Aggregation verschiedener Verlustverteilungen ist die Berechnung des gemeinsamen erwarteten Verlustes (Expected Loss) für eine beliebige Menge von Risiken. Der erwartete Verlust ist das Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit (Probability P), bezogen auf einen bestimmten Zeithorizont, und Verlusthöhe (Total Loss TL): $EL = P \cdot TL$. Bei einem Risiko, das ebenfalls durch seine Eintrittswahrscheinlichkeit P und eine stochastische Zufallsvariable X für die Verlusthöhen beschrieben wird, kann der erwartete Verlust als $EL = P \cdot [E(X)]$ bestimmt werden.

4.2.1.1 Wünschenswerte Eigenschaften des erwarteten Verlusts

Der erwartete Verlust eignet sich grundsätzlich, um Einzelrisiken und aggregierte Risiken (als Summe des erwarteten Verlusts mehrerer Einzelrisiken) vergleichbar zu machen. Risiken können allgemein nach der Größe des erwarteten Verlusts geordnet werden, um sie zu priorisieren. (Eine gewisse Einschränkung für sehr hohe Einzelverluste ist im nächsten Abschnitt beschrieben.) Auch ein Vergleich über die Zeit ist möglich; so kann das Risiko einer Geschäftseinheit im letzten Quartal mit dem Risiko einer Geschäftseinheit im aktuellen Quartal auf Basis des erwarteten Verlusts verglichen werden, um Aussagen über den Trend der Risiken zu machen. Methoden zur Berechnung risikoadjustierter Unternehmenskennzahlen wie z. B. der Risk Adjusted Return on Capital (RAROC) fußen meist ebenfalls auf dem erwarteten Verlust (vgl. Abschnitt 3.4), wobei zu diesem Zweck auch beliebige andere Risikomaße einsetzbar sind.

Ein großer Vorteil des Maßes *erwarteter Verlust* ist seine gute Nachvollziehbarkeit und seine einfache Berechnung. Wegen der Additivität des Erwartungswerts (s. Gleichung (2.9)) können die Erwartungswerte der einzelnen Risiken einfach addiert werden, um ein Gesamtrisiko anzugeben. Wenn das übergeordnete Ziel des Risikomanagementprozesses das Management und die Minderung der Risiken ist, könnte der erwartete Verlust deshalb sogar besser geeignet sein diese Ziele zu unterstützen als kompliziertere Risikomaße [Nat05, S. 32].

4.2.1.2 Einschränkungen

Bei der Betrachtung des unternehmensweiten Risikos gibt es jedoch auch Grenzen für die Aussagefähigkeit des erwarteten Verlustes. So berücksichtigt dieser Wert etwa nicht das Risiko, das aus einer breiteren Streuung der möglichen Gesamtverlusthöhe resultiert.

Auch unterscheidet der Erwartungswert nicht zwischen seltenen, aber gravierenden Risiken („low frequency, high severity“) und häufigen, aber nicht so gravierenden Risiken („high frequency, low severity“). Als Beispiel diene ein Unternehmen, das zu jeder Zeit 50 T€ Eigenkapital vorhält, um mögliche Verluste zu tragen. Hat das Unternehmen ein Risiko, das zu 50 % einmal im Jahr auftritt und einen Verlust von 1 T€ mit sich bringt, dann kann man davon ausgehen, dass dieser Verlust aus den laufenden Erträgen zu tragen ist. Der erwartete Verlust aus diesem Risiko beträgt in 100 Jahren 50 T€. Ein Risiko mit 1 % Eintrittswahrscheinlichkeit und 50 T€ Verlusthöhe bringt in 100 Jahren ebenfalls 50 T€ Verlust; sobald es eintritt, ist aber der Bestand des Unternehmens gefährdet, weil das Eigenkapital nicht mehr ausreicht, das Risiko zu tragen. Der Erwartungswert bezieht sich auf einen unendlich langen Zeitraum, in dem das Risiko „im Mittel“ die angegebenen Verluste bringt. Für eine Bestandsgefährdung reicht es jedoch aus, dass das Unternehmen einmal zahlungsunfähig wird, auch wenn es „im Mittel“ überlebensfähig wäre.

4.2.1.3 Veranschaulichung von Varianz und erwartetem Verlust

Der Effekt, der aus einer breiteren Streuung der Risiken resultiert, soll ebenfalls an einem einfachen Beispiel für den diskreten Fall verdeutlicht werden. Es werden zwei aggregierte Risiken, R_a und R_b , verglichen. R_a setze sich aus zwei Einzelrisiken (als Punktschätzungen), jeweils mit Verlusthöhe (*Total Loss*) $TL_{a_1} = TL_{a_2} = 10\,000\text{ €}$ und Eintrittswahrscheinlichkeit $P_{a_1} = P_{a_2} = 50\%$, zusammen. R_b enthalte vier Einzelrisiken, ebenfalls mit $TL_{b_i} = 10\,000\text{ €}$, $i = 1, \dots, 4$, aber $P_{b_i} = 25\%$, $i = 1, \dots, 4$.

Die Erwartungswerte ergeben sich zu:

$$E(R_a) = TL_{a_1} \cdot P_{a_1} + TL_{a_2} \cdot P_{a_2} = 2 \cdot 10\,000\text{ €} \cdot 50\% = 10\,000\text{ €}$$

$$E(R_b) = \sum_{i=1}^4 TL_{b_i} \cdot P_{b_i} = 4 \cdot 10\,000\text{ €} \cdot 25\% = 10\,000\text{ €}$$

Aus dem Vergleich von Risiko A und Risiko B wird deutlich, dass der erwartete Verlust aus beiden Risiken gleich ist. Im ungünstigsten Fall könnte bei R_a jedoch nur ein Verlust von 20 000 € auftreten, während bei R_b ein Verlust von 40 000 € droht, falls alle vier enthaltenen Einzelrisiken gleichzeitig eintreten. Die Betrachtung des schlimmsten möglichen Falles (engl.: *worst case*) als Summe der maximalen Verluste aller erfassten Risiken ist aber ebenfalls von geringem Nutzen, da die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Katastrophenszenarios, in dem alle Risiken gleichzeitig mit voller Höhe eintreten, mit steigender Zahl von Risiken gegen Null geht [Gle04b, S. 354].

Ein weiterer augenfälliger Unterschied ist, dass die Streuung der Verluste bei R_b größer ist als bei R_a , so dass aus R_b auch in ungünstigen Fällen, die nicht dem „Worst Case“ entsprechen, höhere Verluste zu erwarten sind. Da im Risikomanagement nicht der erwartete Verlust im Vordergrund steht, sondern in der Regel die Frage nach dem Verlust in einem ungünstigen Fall gestellt wird, erscheint der erwartete Verlust nicht als das geeignetste Risikomaß.

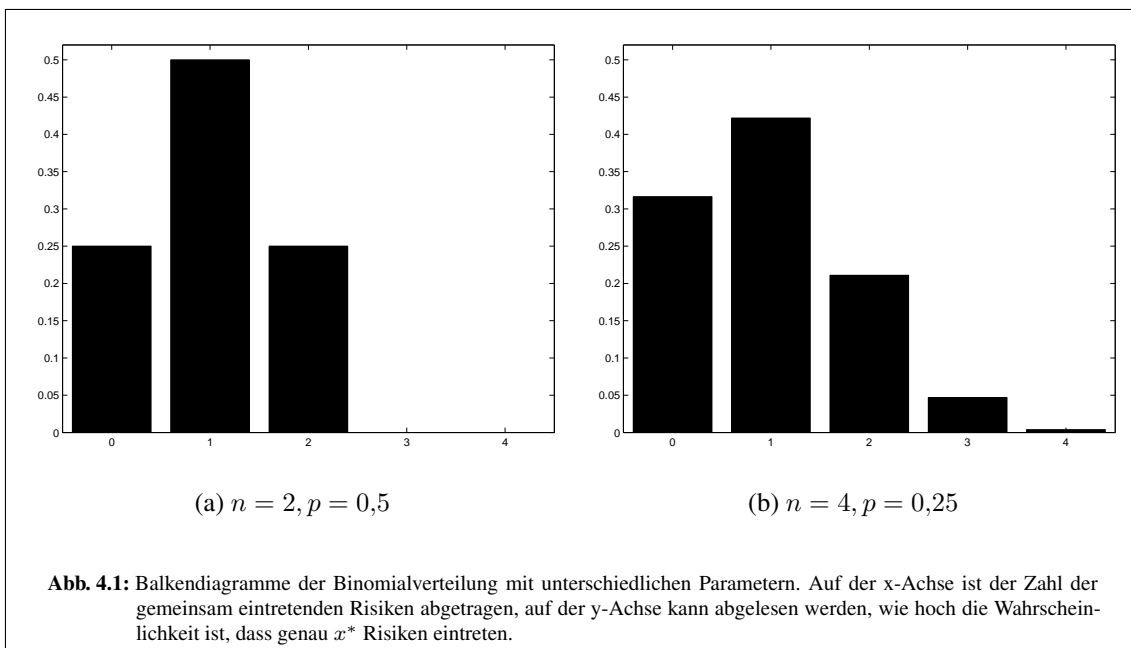
Man könnte nun meinen, der Erwartungswert könnte in Kombination mit der Varianz bzw. der Standardabweichung (s. Abschnitt 2.6.4.2) als Streuungsmaß eine gute Aussagekraft besitzen. Im Folgenden wird die Standardabweichung für R_a und R_b direkt berechnet.

Da die enthaltenen Risiken immer die gleiche Verlusthöhe haben, entsprechen die Gesamtverlustverteilungen von R_a und R_b jeweils einer Binomialverteilung (ggf. multipliziert mit dem Faktor 10 000), sofern man Unabhängigkeit von R_a und R_b unterstellt. Die Binomialverteilung ist wie folgt definiert [Bol98, S. 50]:

$$B(X = m) = \binom{n}{m} p^m (1 - p)^{n-m} \text{ für } m = 0, \dots, n \quad (4.1)$$

Die Verteilung beschreibt das Ergebnis eines *Bernoulli-Prozesses*. Ein Bernoulli-Prozess ist eine Kette von mehreren Ereignissen mit genau zwei möglichen Zuständen (in diesem Beispiel: Risiko tritt ein/Risiko tritt nicht ein), die unter gleichen Bedingungen (sog. „Ziehen mit Zurücklegen“) wiederholt werden. Der Parameter n der Verteilung entspricht hier der Anzahl der Risiken, p ist die Eintrittswahrscheinlichkeit jedes Risikos.

Der Erwartungswert der Binomialverteilung bestimmt sich aus $n \cdot p$, die Varianz ergibt sich aus $n \cdot p \cdot q$, mit $q = 1 - p$. Bei der Skalierung auf die Verlusthöhe von $TL = 10\,000\text{ €}$ muss



der Erwartungswert mit TL und die Varianz mit TL^2 multipliziert werden. In folgender Tabelle werden die beiden Beispielrisiken A und B noch einmal zusammengefasst und die Standardabweichung wird als Wurzel der Varianz entsprechend berechnet:

Risiko	n	p	$E(R_x)$	$Var(R_x) = n \cdot p \cdot (1 - p) \cdot TL^2$
A	2	50 %	10 000 €	7 071 €
B	4	25 %	10 000 €	8 660 €

Die Standardabweichung zeigt das Risiko aus der *Streuung* der möglichen Gesamtergebnisse an, das daher rührt, dass sehr viele kleinere Risiken gefährlich werden können, wenn sie *gleichzeitig* eintreten.

Mit Erwartungswert und Varianz werden also zwei Zahlen benötigt, um Risiken besser zu beschreiben, als dies allein durch einen Vergleich von Erwartungswerten möglich ist. Es gibt außerdem weitere Eigenschaften von Verteilungen (wie Schiefe und Konzentration), die ebenfalls bedeutsam für die Beschreibung von ungünstigen Szenarien sind, weshalb auch eine Beschreibung mit den ersten zwei Momenten Erwartungswert und Varianz (bzw. Standardabweichung) unzulänglich für die Analyse operationeller Risiken ist.

Es wird eine alternative Kennzahl benötigt, die geeignet ist, mehrere Eigenschaften der Gesamtverlustverteilung möglichst einfach zu beschreiben. Im Folgenden soll gezeigt werden, warum sich der *Value at Risk* gut als ein solches Risikomaß eignet.

4.2.2 Value-at-Risk als Risikomaß

Formal lässt sich der Value at Risk einer Verlustverteilung X in Anlehnung an Rachev et al. [RMF05, S. 221] wie folgt definieren:

$$VaR_\alpha(X) = \min\{x | (P(X \leq x) > \alpha)\} \quad (4.2)$$

Das Konfidenzniveau⁵ α bezeichnet hier das α -Quantil der Verlustverteilung⁶. Die Gleichung lässt sich wie folgt umschreiben: Der Value at Risk ist der kleinste Wert x aus X , für den die Wahrscheinlichkeit eines Verlusts größer oder gleich x gerade das vorgegebene Konfidenzniveau α übersteigt. Die häufigste Definition (vgl. z. B. [RMF05, S. 220], [Kno05, S. 99], [Jor97, S. 19]) umfasst noch den Betrachtungszeitraum, der in die Ermittlung von X einfließt: *Der Value at Risk ist der höchste mögliche Verlust, der in einer gegebenen Zeitspanne mit der Wahrscheinlichkeit α nicht überschritten wird.*

Diese Kennzahl ist vergleichsweise intuitiv verständlich. Vorteilhaft ist, dass der Value at Risk durch eine einzige Zahl angegeben wird; im Gegensatz zu einzelnen empirischen Parametern wie Erwartungswert oder Varianz kann der VaR aber eine Veränderung mehrerer Momente einer angenommenen Gesamtverlustverteilung (*Erwartungswert* als Lageparameter, *Varianz* als Streuungsmaß, *Schiefe* als Symmetriemaß und *Kurtosis* als Wölbungsparameter; s. Abschnitt 2.6.4) widerspiegeln.

Um den Value at Risk als eine reelle Zahl angeben zu können, werden von den drei Dimensionen *Eintrittswahrscheinlichkeit*, *Verlusthöhe* und *Zeit* eines Risikos zwei Dimensionen vorgegeben.

4.2.2.1 Festlegung der Haltedauer

Die Dimension *Zeit* findet sich in der Definition des VaR in der *Haltedauer* wieder. Der Begriff „Haltedauer“ entstammt dem ursprünglichen Anwendungsgebiet des Value at Risk als Maßzahl für das Marktpreisrisiko eines Portfolios von Wertpapieren und bezeichnet dort die übliche Zeitspanne, innerhalb derer es möglich ist, eine Wertpapierposition glattzustellen.

Die Definition lässt sich aber verallgemeinern: Die Haltedauer definiert einen einheitlichen Betrachtungszeitraum für alle Risiken. Im Bereich des Marktrisikos wird dafür die übliche Haltedauer von Wertpapieren im Portfolio bzw. der Zeitraum, in dem eine vollständige Liquidation der Positionen üblicherweise möglich ist, zu Grunde gelegt [Jor97, S. 86]. Sollen zwei Portfolios mit unterschiedlichen Haltedauern aggregiert werden, wird in der Praxis auf das so genannte „Wurzelgesetz“ zurückgegriffen, um den VaR normalverteilter Risiken über verschiedene Haltedauern zu skalieren. Dabei wird eine Proportionalität von Zeit und Varianz unterstellt [Hag04, S. 43]. Bereits diese Annahme ist nicht immer korrekt, da sie unterstellt, dass die Marktpreisänderungen unabhängig identisch verteilt sind, d. h. dass keine Marktpreisänderung die jeweils darauffolgende Änderung beeinflusst⁷.

Im Bereich der operationellen Risiken lässt sich die Normalverteilungsannahme nicht halten [Cru02, S. 101], und der Zeithorizont der Risiken variiert stark. Je größer der Unterschied zwischen den Haltedauern, desto stärker macht sich auch der Fehler durch die Skalierung mit Hilfe des „Wurzelgesetzes“ bemerkbar. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass operationelle Risiken schon bei der Schätzung auf einen einheitlichen Zeithorizont bezogen werden müssen, denn *ceteris paribus* steigt die Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. -häufigkeit eines Risikos proportional zum betrachteten Zeitraum.

⁵Der Begriff *Konfidenzniveau* stammt eigentlich aus der Testtheorie, hat im Zusammenhang mit dem Value at Risk aber eine (historisch entstandene) andere Bedeutung, die hier erläutert ist.

⁶die Verluste werden in einer Verlustverteilung als positive Zahlen angegeben. In einer Ergebnisverteilung liegen Verluste dagegen unter dem Nullpunkt und entsprechen negativen Zahlen.

⁷Ein solcher Prozess wird als *Markov-Prozess* bezeichnet.

4.2.2.2 Festlegung des Konfidenzniveaus

Die Dimension *Eintrittswahrscheinlichkeit* wird durch das *Konfidenzniveau* festgelegt. Das Konfidenzniveau entspricht wie oben geschildert dem betrachteten Quantil der Gesamtverlustverteilung. Die Festlegung ist notwendig, um die zweidimensionale Gesamtverlustverteilung auf eine (eindimensionale) Zahl zu reduzieren.

Es gibt dabei kein „richtiges“ Konfidenzniveau, wenn der Value at Risk lediglich zur Kommunikation der Risiken oder zum Vergleich von Risiken untereinander genutzt wird [KN03, S. 2]. Hier zählt die relative Höhe des Verlustmaßes. Soll der Value at Risk jedoch als Maß für das notwendige Eigenkapital zum Tragen von Verlusten verwendet werden, hängt die resultierende Eigenkapitalhöhe direkt vom gewählten Konfidenzniveau ab. Vom gewählten Konfidenzniveau hängt es auch ab, wie sensibel der Value at Risk auf eine Veränderung der höheren Momente der Gesamtverlustverteilung (wie Varianz oder Schiefe) reagiert. Damit besteht ein Zusammenhang zwischen der Risikoaffinität (oder in anderen Worten: dem Grad des Optimismus') der Organisation und dem gewählten Konfidenzniveau: Je risikoaffiner die Organisation ist, desto niedriger wird das betrachtete Konfidenzniveau sein.

In der Praxis haben sich abhängig vom zugrunde liegenden Modell, der Branche und dem Einsatzzweck Werte zwischen 80 % [Deu05] und 99,97 % [Wor03, S. 17] durchgesetzt.

Der Value at Risk besitzt – im Gegensatz zum Erwartungswert – *nicht* die Eigenschaft der Additivität. Aus jeder aggregierten Verlustverteilung muss der Value at Risk erneut bestimmt werden.

4.2.3 Exkurs: Basel II und unerwartete Verluste

Im Bereich der Kreditrisiken werden die Empfehlungen des Baseler Ausschusses für Bankenaufsicht über die internationale Konvergenz der Kapitalmessung und Eigenkapitalanforderungen („Basel II“ [BaselIII]) umgesetzt und treten in Europa ab 2007 in Kraft. Da auch nach Basel II Risiko gemessen wird, soll die Methode hier vorgestellt und auf ihre Schnittstellen mit und Übertragbarkeit auf die Messung von Betriebsrisiken untersucht werden.

In den Regelungen wird ebenfalls zwischen erwarteten und unerwarteten Verlusten unterschieden. Die allgemeine Formel für den erwarteten Verlust lautet dort

$$EL = PD \cdot LGD \cdot EAD,$$

wobei EL den erwarteten Verlust („Expected Loss“), PD die Ausfallwahrscheinlichkeit des Kreditnehmers („Probability of Default“), EAD die erwartete Höhe der ausstehenden Forderung bei Ausfall („Exposure at Default“) und LGD den Anteil der Forderung, die tatsächlich (z. B. nach Berücksichtigung von Sicherheiten) dem Ausfallrisiko unterliegt (Verlustrate, „Loss Given Default“), bezeichnet.

Dieser Ansatz entspricht der Beschreibung eines Betriebsrisikos durch Eintrittswahrscheinlichkeit (Probability P, entsprechend der PD bei Basel II) und Auswirkung (Impact I, entsprechend LGD [%] · EAD [€]).

Im Basel-II-Papier wird für die Berechnung des Eigenkapitals, das eine Bank im „Internal Ratings Based Approach“ (IRB-Ansatz) vorhalten muss, um *unerwartete Verluste* zu tragen, ein 99,9%-Value-at-Risk berechnet. Für dessen Berechnung benötigen die Banken keine

weiteren Informationen als die für die Berechnung des *erwarteten Verlustes* benötigten Eingabevariablen. Folgende weitere Annahmen werden den Banken dafür vorgegeben: die Ausfallereignisse seien normalverteilt und die Korrelation der Risiken innerhalb verschiedener Kreditklassen verhalte sich entsprechend vorgegebener Formeln. In der Klasse der Kredite an Unternehmen, Banken und Staaten lautet die Formel für die Bestimmung des Korrelationskoeffizienten beispielsweise

$$\rho = 0,12 \cdot \left(\frac{1 - e^{-50 \cdot PD}}{1 - e^{-50}} \right) + 0,24 \cdot \left(1 - \frac{1 - e^{-50 \cdot PD}}{1 - e^{-50}} \right),$$

in der die einzige Variable die Ausfallwahrscheinlichkeit PD des jeweiligen Kredites ist [Bas04, TZ 272]. Der Formel liegt die Annahme (oder Erfahrung) zu Grunde, dass Kredite mit niedriger Ausfallwahrscheinlichkeit stärker korreliert sind als Kredite mit hoher Ausfallwahrscheinlichkeit [Cec04, S. 65].

Die Formel für die Berechnung des zu unterlegenden Eigenkapitals⁸ besteht aus zwei Faktoren [Cec04, S. 60–62]. Der erste Faktor ist der *unerwartete Verlust pro Geldeinheit des Kreditexposures* als Differenz von $VaR_{99,9}$ und erwartetem Verlust:

$$F_1 = \Phi \left(\frac{\Phi^{-1} \cdot PD + 3,09024 \cdot \sqrt{\rho}}{\sqrt{1 - \rho}} \right) - PD,$$

mit Φ als Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung, Φ^{-1} als deren inverser Verteilung und ρ der Korrelation aus der Formel für die Kreditklasse (s. o.). 3,09024 ist das 99,9%-Quantil der Standardnormalverteilung. Der Abzug der Ausfallwahrscheinlichkeit PD erfolgt, weil diese bei einer angenommenen Verlustrate LGD von 100 % genau den *erwarteten Verlust pro Geldeinheit* bezeichnet.

Der zweite Faktor nimmt eine Laufzeitanpassung („maturity adjustment“) vor, weil F_1 auf eine Restlaufzeit von einem Jahr bezogen ist. Wie diese Formel abgeleitet wurde, ist nicht öffentlich bekannt [Cec04, S. 62]. Sie wird hier der Vollständigkeit halber genannt:

$$b = (0,11852 - 0,05478 \cdot \ln(PD))^2 \quad (4.3)$$

$$F_2 = \frac{1 + (M - 2,5) \cdot b}{1 - 1,5 \cdot b}, \quad (4.4)$$

wobei M die Restlaufzeit in Jahren („Maturity“) darstellt und \ln den natürlich Logarithmus bezeichnet.

Die beiden Faktoren beziehen sich auf eine Geldeinheit. Um die absolute Höhe der für unerwartete Verluste zu unterlegenden Eigenmittel K zu bestimmen, werden die Faktoren mit der Verlusthöhe multipliziert:

$$K = F_1 \cdot F_2 \cdot LGD \cdot EAD.$$

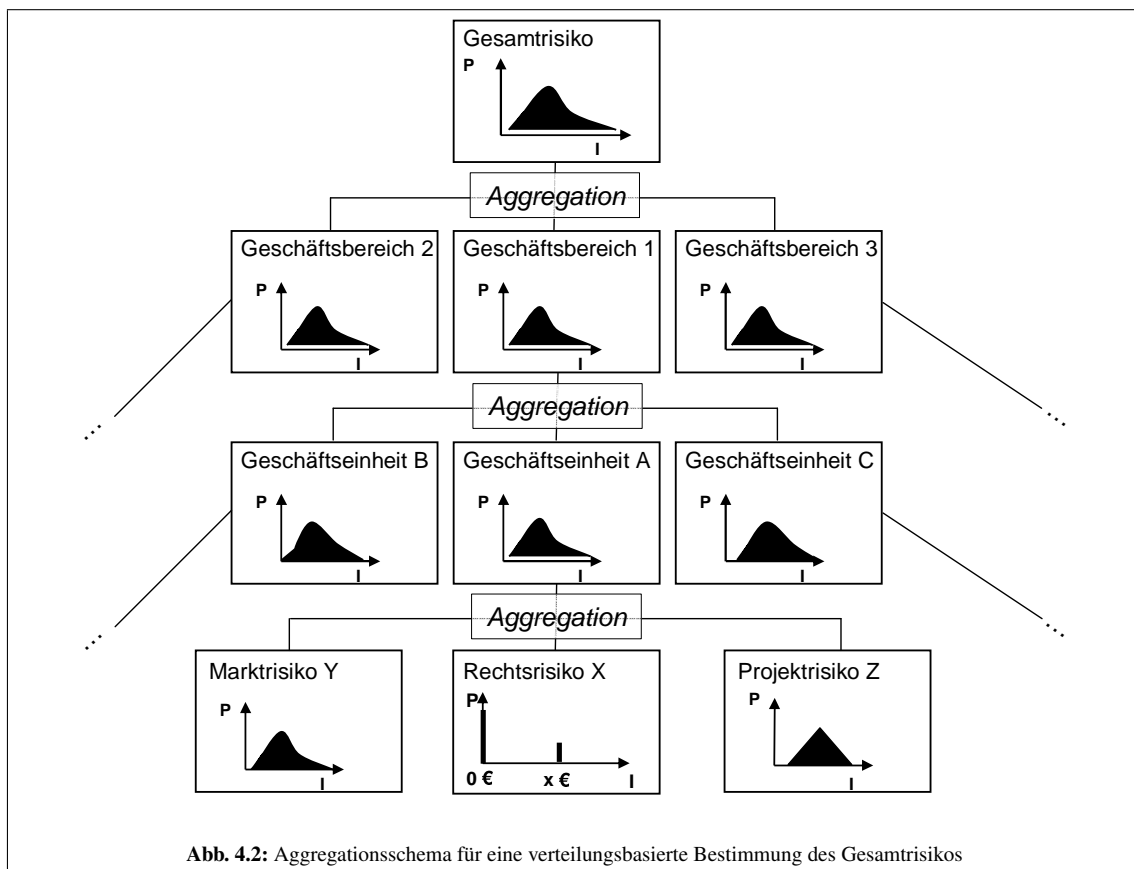
Dieser Ansatz erlaubt die Bestimmung eines Gesamtrisikos in Form eines Value at Risk aufgrund einer als bekannt angenommenen Beziehung von erwarteten zu unerwarteten Verlusten. Leider ist eine Übertragung dieses in der Anwendung einfachen Ansatzes auf Betriebsrisiken nicht möglich, weil wegen der Heterogenität von Betriebsrisiken weder die Normalverteilungsannahme für die aggregierten Verlustverteilungen noch eine zentrale Schätzung der Korrelation für Betriebsrisiken sinnvoll erscheint.

⁸Die Formel gilt für nicht ausgefallene Forderungen.

4.3 Analytische Aggregation und Simulation

Für die Bestimmung des gemeinsamen Erwartungswerts mehrerer Risiken reicht die einfache Addition der Erwartungswerte aus. Trotz den in Abschnitt 4.2.1.2 beschriebenen Einschränkungen eignet sich der Erwartungswert hinlänglich, um bestimmte Zielsetzungen des Risikomanagements quantitativ zu unterstützen (s. Abschnitt 2.2). Für die Erkennung und Quantifizierung von bestandsgefährdenden Entwicklungen, die aus der Verkettung mehrerer Einzelrisiken resultieren, reicht die Betrachtung des erwarteten Verlusts nicht mehr aus. Auch die Bestimmung des zu hinterlegenden Eigenkapitals kann nicht auf der Basis des erwarteten Verlusts erfolgen.

Soll die Bestimmung des aggregierten Risikos mit Hilfe anderer Risikomaße erfolgen, wird es notwendig, die gemeinsame *Verteilung* der Verluste aus mehreren Einzelrisiken zu bestimmen. Die Ermittlung dieser aggregierten Verteilung kann nach unterschiedlichen Verfahren vorgenommen werden. Das grundsätzliche Schema der Aggregation ist in Abbildung 4.2 für die Dimension der Unternehmensebenen schematisch dargestellt. Es sollte aber beachtet werden, dass eine weitere Unterteilung der Risiken auf jeder Ebene nach weiteren Klassifizierungsmerkmalen erfolgen kann.



4.3.1 Varianz-Kovarianz-Modell

Im Varianz-Kovarianz-Modell erfolgt die Bestimmung der gemeinsamen Verlustverteilung analytisch. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Ursprungsverteilungen als Normalverteilungen vorliegen. Dieser Ansatz stammt aus dem Bereich von Marktpreisrisiken, wo zum Beispiel das Gesamtrisiko eines Portfolios von Wertpapieren bestimmt werden soll. Eine separate Festlegung der Eintrittswahrscheinlichkeit ist im Varianz-Kovarianz-Modell nicht

vorgesehen, da sich im Bereich von Marktrisiken die Frage nicht stellt, *ob* ein Marktpreis schwankt, sondern nur, *wie stark* er schwankt. Da nicht sichergestellt werden kann, dass alle operationellen Risiken durch Normalverteilungen quantifiziert werden können, ist dieses Modell für diese Anwendung nicht geeignet. Für eine genauere Beschreibung der Ansätze im Varianz-Kovarianz-Modell wird auf [Jor97, S. 205 ff.] und [Hag04] verwiesen.

4.3.2 Monte Carlo Simulation

Häufig wird die Monte Carlo Simulation in den „Risikomanagement-Handbüchern“ in einem Atemzug mit bestimmten Verfahren zur Gewinnung der Verlustverteilungen der Einzelrisiken (zum Beispiel dem Fitting parametrischer Funktionen auf historische Daten) oder zur Analyse der Ergebnisverteilung (meistens der Angabe eines Value at Risk) genannt. Es ist aber festzuhalten, dass nur die folgenden Schritte zwingend Teil einer Monte Carlo Simulation sind:

1. Wiederholtes Generieren von (Pseudo-)zufallszahlen
2. Eingabe der Zufallszahlen in die Inputfunktionen eines Modells
3. Propagieren der Eingabewerte durch das Modell und Speichern der Ausgabewerte
4. Angabe der Verteilung der Ausgabewerte

Damit eignet sich die Monte Carlo Simulation sehr gut für die Aggregation von Risiken. Dabei entsprechen Schritt **1** und **2** dem Ziehen von Verlustereignissen (Risiko tritt ein oder nicht, bzw. Häufigkeit des Eintritts in diesem Simulationslauf) und Verlusthöhen aus den vorgegebenen stochastischen Verteilungen (für eine genaue Erklärung s. Abschnitt 4.3.2.2). Schritt **3** besteht aus einer einfachen Addition der gezogenen Verlustwerte entlang einer festgelegten Struktur (vgl. Abschnitt 4.1). Schritt **4** kann für jeden Knoten in der gebildeten Struktur, also für jedes sinnvolle „Aggregat“, erfolgen.

Die Monte Carlo Simulation als solche ist jedoch flexibler. Zum Beispiel können in Schritt **3** auch Modelle verwendet werden, die über das reine Zusammenzählen von Schäden hinausgehen und die zum Beispiel funktionale oder logische Abhängigkeiten verschiedener Risiken untereinander abbilden können (vgl. dazu Abschnitt 5.5).

Für das Verständnis der folgenden Ausführungen ist die Differenzierung zwischen der statischen Simulation *einer* Periode und der dynamischen Simulation einer *Folge mehrerer Perioden* wichtig. Die Simulation mehrerer Perioden verwendet das Simulationsergebnis der letzten Runde als Ausgangspunkt für die Entwicklung in der nächsten Runde. Solche Simulationen eignen sich nur, wenn wenige Faktoren mit gut bekannten Wechselwirkungen simuliert werden sollen, also zum Beispiel die Entwicklung eines Wechselkurses über die Zeit. Es können auch komplexere Systeme (wie ganze Volkswirtschaften oder die Weltwirtschaft) auf einer hohen Abstraktionsebene modelliert werden. Solche Modelle sind im Gebiet der „System Dynamics“ gebräuchlich; sie sind häufig deterministisch (ohne Verwendung von Zufallszahlen).

In dieser Arbeit werden jedoch nur statische Modelle mit stochastischen Zufallsvariablen als Eingangsgrößen betrachtet, die mit dem Begriff „Monte Carlo Simulation“ bezeichnet werden. In Abschnitt 5.5.6 auf S. 66 wird vorgeschlagen, ein rein stochastisches Modell um deterministische Zusammenhänge zu erweitern, um bekannte Ursache-Wirkungs-Beziehungen besser modellieren zu können.

4.3.2.1 Generieren von Zufallszahlen

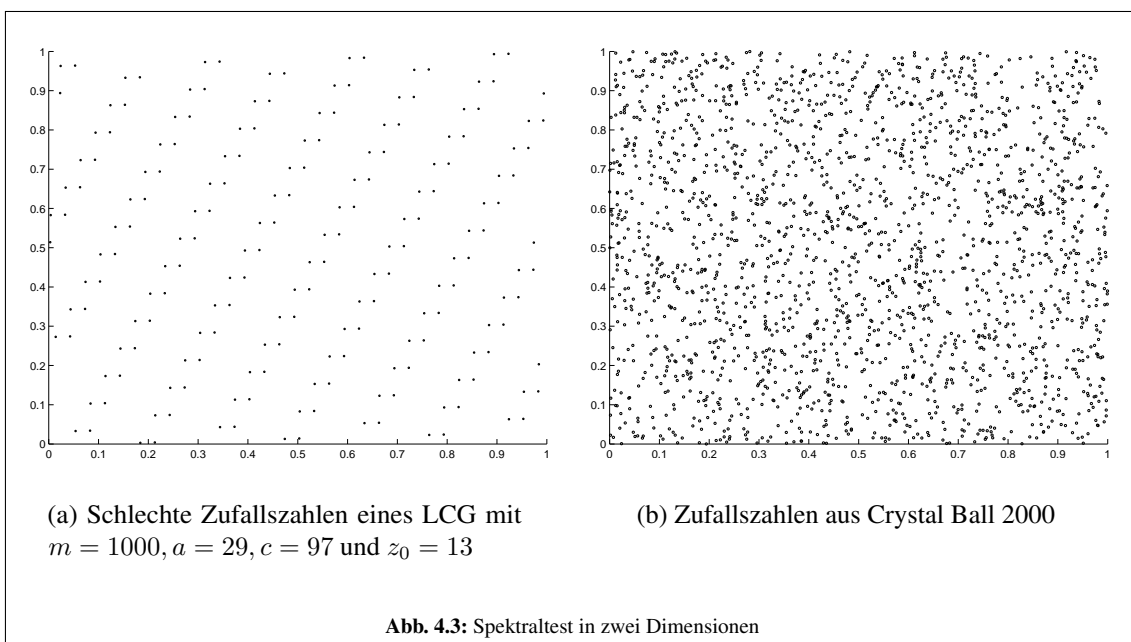
Da das Generieren von Zufallszahlen ein zentraler Schritt der Monte Carlo-Simulation ist, soll hier näher erläutert werden, wie das Erzeugen der Zufallszahlen durchgeführt werden kann.

Die in der Praxis eingesetzten deterministischen Algorithmen für die Erzeugung von Zufallszahlen können nur Pseudozufallszahlen generieren. Echte Zufallszahlen können nur erzeugt werden, indem zufällige Prozesse (z. B. Münzwurf, radioaktiver Zerfall etc.) beobachtet werden. Für Simulationszwecke sind Pseudozufallszahlen aber in der Regel ausreichend, da eine gleichmäßige Verteilung über das Intervall $[0, 1]$, eine große Sequenzlänge ohne Wiederholungen und die *scheinbare* Unabhängigkeit der erzeugten Zahlen ausreicht, um ein repräsentatives Simulationsergebnis zu erzeugen.

Eine häufig verwendete Klasse von Zufallszahlengeneratoren sind die linearen Kongruenzgeneratoren (engl.: *Linear Congruential Generators, LCG*). Diese erzeugen zunächst eine Folge von natürlichen Zahlen z_1, z_2, \dots, z_m nach der Formel

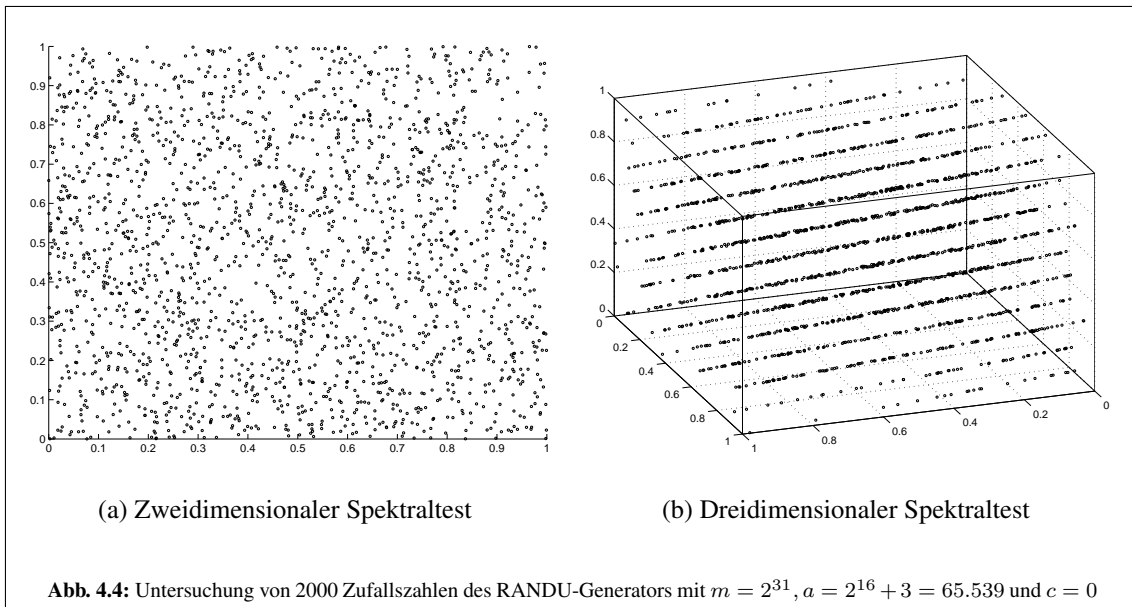
$$z_i = (a \cdot z_{i-1} + c) \pmod{m}, \quad (4.5)$$

mit m als *Modulus*, a als *Multiplikator*, c als *Inkrement* und z_0 als *Startwert* bzw. „Seed“. Zufallszahlen aus dem Intervall $[0, 1]$ ergeben sich als $u_i = \frac{z_i}{m}$ [LK00, S. 406].



Ein Test für die Güte der Zufallszahlen ist der *Spektraltest*, bei dem d -Tupel von jeweils aufeinanderfolgenden Zufallszahlen $(u_1, u_2, \dots, u_d), (u_2, u_3, \dots, u_{d+1})$ untersucht werden. Fallen diese Tupel in eine kleine Zahl von $(d - 1)$ -Hyperebenen des d -dimensionalen Einheitswürfels $[0, 1]^d$, so besitzen die erzeugten Zufallszahlen nur eine schlechte „Pseudounabhängigkeit“.

In Abbildung 4.3 wird das Ergebnis eines bewusst schlecht gewählten linearen Kongruenzgenerators mit den Parametern $m = 1000, a = 29, c = 97$ und $z_0 = 13$ mit Zufallszahlen aus dem Programm „Crystal Ball 2000“ verglichen, die dort mit einem Linearen Kongruenzgenerator (LCG) mit den Parametern $m = 2^{31} - 1, a = -630\,360\,016$ und $c = 0$ erzeugt werden [Dec04, S. 318]. Die Funktion *RAND* in Microsoft Excel Bis Version 5.0)



benutzt einen LCG mit $m = 1$, $a = 9821$, $c = 0,211327$ und $z_0 = 0,5^9$; ab Version 5.0 wird z_0 in der Standardeinstellung aus der Systemzeit bestimmt, in vorigen Versionen muss dies extra aktiviert werden. In Microsoft Excel 2003 wurde der Wichmann-Hill-Algorithmus implementiert, der verschiedenen Tests für die Güte von Zufallszahlen standhält¹⁰.

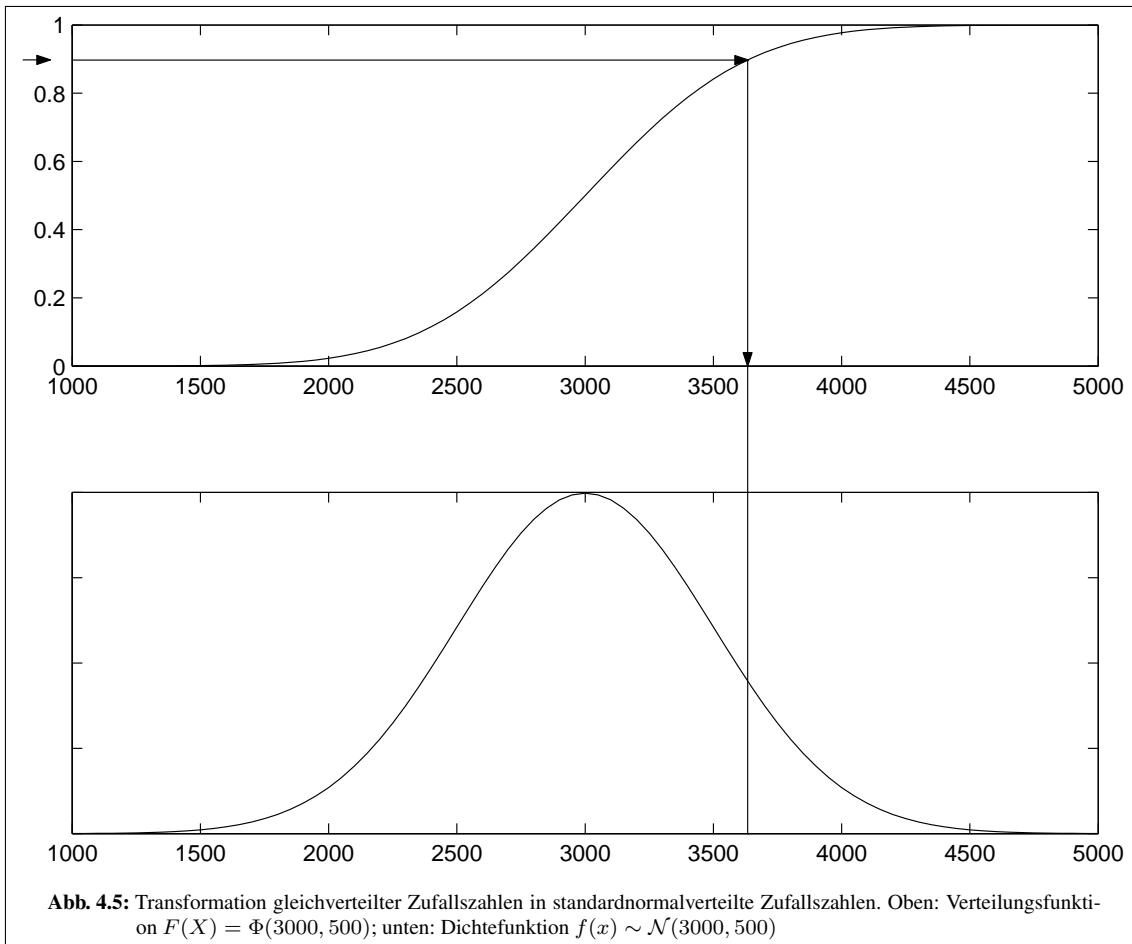
Ein Beispiel für Abhängigkeiten in höheren Dimensionen lässt sich am berüchtigten RANDU-Algorithmus zeigen, der seit den 1960ern Jahren in der Praxis verwendet wurde. RANDU ist ein linearer Kongruenzgenerator mit den Parametern $m = 2^{31}$, $a = 2^{16} + 3 = 65\,539$ und $c = 0$. In Abbildung 4.4 wird deutlich, dass die Zufallszahlen u_i und u_{i+1} eine hohe (pseudo-)Unabhängigkeit aufweisen; betrachtet man jedoch u_i , u_{i+1} und u_{i+2} zusammen, so fällt auf, dass alle Zufallszahlen auf 15 Ebenen im Einheitswürfel liegen. Bessere Algorithmen sind z. B. bei Law und Kelton [LK00, S. 406–427] beschrieben.

4.3.2.2 Nicht gleichverteilte Zufallszahlen

Bei einer Monte Carlo-Simulation von Risiken entspricht der Schritt der *Eingabe der Zufallszahlen in die Inputfunktionen des Modells* der Transformation der $[0, 1]$ -gleichverteilten Zufallszahlen U in Zufallszahlen Z , die der angegebenen stochastischen Funktion über die möglichen Verlusthöhen des Risikos folgen. Anschaulich lässt sich dieser Schritt an der Normalverteilung demonstrieren. In Abbildung 4.5 wird dargestellt, wie die aus der $[0, 1]$ -Gleichverteilung gezogene Zufallszahl 0,9 in die korrespondierende Zufallszahl der Normalverteilung mit $\mu = 3000$ und $\sigma = 500$ transformiert wird. Dazu wird die Eigenschaft der Verteilungsfunktion ausgenutzt, als Integral der Dichtefunktion nur Werte zwischen 0 und 1 anzunehmen. Das Inverse der Verteilungsfunktion $F(x)$ ist nämlich genau der gesuchte Wert aus der Zielverteilung. Somit ist die gesuchte Zufallszahl $z_i = F^{-1}(u_i)$. In unserem Beispiel ist somit der gezogene Verlust aus dem Ereignis in diesem Simulationslauf $z_i = F^{-1}(0,9) = 3640,78$. Die Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass für die Verteilungsfunktion eine Inverse existiert. Im diskreten Fall ist das immer gegeben, im stetigen Fall ist eine numerische Annäherung möglich, falls keine Inverse existiert.

⁹vgl. <http://support.microsoft.com/kb/q86523/>

¹⁰Eine Beschreibung findet sich unter <http://support.microsoft.com/default.aspx?kbid=828795&product=xl2003>



Speziell zur Erzeugung standardnormalverteilter Zufallszahlen gibt es auch schnellere numerische Verfahren wie die Box-Muller- oder die Polar-Methode.

4.3.2.3 Generieren von korrelierten Zufallszahlen

Sind zwei Zufallsvariablen¹¹ X_1 und X_2 positiv korreliert¹², so gehen große Werte von X_1 tendenziell mit großen Werten von X_2 einher. Um diesen Effekt in einer Monte Carlo Simulation zu berücksichtigen, sollen nun zwei Reihen von Zufallszahlen erzeugt werden, die eine bestimmte Korrelation aufweisen [Jor01, S. 302-304].

Im Folgenden wird der Fall mit k Zufallsvariablen (k Risiken) betrachtet. Dabei sollen zunächst unabhängig voneinander mit der im vorigen Abschnitt beschriebenen Methode zwei Vektoren von Zufallszahlen erzeugt werden, die den vorgegebenen Randverteilungen von $X_i, i = 1, \dots, k$ folgen und die gewünschte lineare Korrelation ρ_{X_1, \dots, X_k} aufweisen. Für normalverteilte Zufallsvariablen ist die Bestimmung nach dem Folgenden Verfahren exakt möglich [Mil05, S. 42–45]:

Seien $X = (X_1, \dots, X_k)$ eine k -dimensionale multivariate *standardnormalverteilte* Zufallsvariable, und sei M eine $n \times k$ -Matrix als Stichprobe von n unabhängigen Zufallszahlen aus X . Bezeichne M' die Transponierte von M . Sei ρ_{X_1, \dots, X_k} die $k \times k$ -Korrelationsmatrix von X_1, \dots, X_k . Bezeichne \mathcal{I} die Identitätsmatrix.

¹¹Definition: s. Abschnitt 2.6.3. Anstelle des allgemeinen Begriffs „Zufallsvariable“ kann man sich hier auch die Verlustverteilung eines Risikos vorstellen.

¹²Definition: s. Abschnitt 2.6.6.3

Aufgrund der Annahmen bestimmt sich die Korrelationsmatrix der Zufallszahlen in M durch $\rho_M = \frac{1}{n} \cdot M' M$ [Mil05, S. 42]. Wegen der Unabhängigkeit der Spalten gilt $\frac{1}{n} \cdot M' M = \mathcal{I}$.

1. Bestimme mit Hilfe der Cholesky-Faktorisierung die obere Dreiecksmatrix C , so dass $C' C = \rho_{X_1, \dots, X_k}$
2. Setze $T = MC$. Für die Korrelation von T gilt: $\rho_T = \frac{1}{n} \cdot T' T = \frac{1}{n} \cdot C' M' M C = C' C = \rho_{X_1, \dots, X_k}$, da $M' M = \mathcal{I}$.

Das Verfahren soll an einem kleinen Beispiel mit drei korrelierten Variablen durchgerechnet werden. Die Cholesky-Zerlegung der Korrelationsmatrix $\rho = C' C$ lautet für drei Variablen ausgeschrieben:

$$\begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{12} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{13} & \rho_{23} & \rho_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ 0 & c_{22} & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \end{pmatrix}$$

Die Korrelationsmatrix muss sich wie folgt aus der Zerlegung ergeben:

$$\begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{12} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{13} & \rho_{23} & \rho_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11}^2 & c_{11} \cdot c_{12} & c_{11} \cdot c_{13} \\ c_{11} \cdot c_{12} & c_{12}^2 + c_{22}^2 & c_{12} \cdot c_{13} + c_{22} \cdot c_{23} \\ c_{11} \cdot c_{13} & c_{12} \cdot c_{13} + c_{22} \cdot c_{23} & c_{13}^2 + c_{23}^2 + c_{33}^2 \end{pmatrix}$$

Sei nun ρ_Z die gewünschte Ziel-Korrelationsmatrix:

$$\rho = \begin{pmatrix} 1 & 0,3 & 0,5 \\ 0,3 & 1 & 0,7 \\ 0,5 & 0,7 & 1 \end{pmatrix}$$

Mit der Cholesky-Faktorisierung (einem Spezialfall des Gauß'schen Eliminationsverfahrens) lassen sich die einzelnen Werte für die Matrix C bestimmen [Wie04, S. 189–192]:

$$\rho_{11} = c_{11}^2 \Rightarrow c_{11} = \sqrt{\rho_{11}} = \sqrt{1} = 1$$

$$\rho_{12} = c_{11} \cdot c_{12} \Rightarrow c_{12} = \frac{\rho_{12}}{c_{11}} = \frac{0,3}{1} = 0,3$$

$$\rho_{13} = c_{11} \cdot c_{13} \Rightarrow c_{13} = \frac{\rho_{13}}{c_{11}} = \frac{0,5}{1} = 0,5$$

$$\rho_{22} = c_{12}^2 + c_{22}^2 \Rightarrow c_{22} = \sqrt{\rho_{22} - c_{12}^2} = \sqrt{1 - 0,3^2} = 0,9539$$

$$\rho_{23} = c_{12} \cdot c_{13} + c_{22} \cdot c_{23} \Rightarrow c_{23} = \frac{\rho_{23} - c_{12} \cdot c_{13}}{c_{22}} = \frac{0,7 - 0,3 \cdot 0,5}{0,9539} = 0,5766$$

$$\rho_{33} = c_{13}^2 + c_{23}^2 + c_{33}^2 \Rightarrow c_{33} = \sqrt{\rho_{33} - c_{13}^2 - c_{23}^2} = \sqrt{1 - 0,5^2 - 0,9539^2} = 0,6462$$

Aus der Matrix M von unabhängig identisch standardnormalverteilten Beispielszufallszahlen ergibt sich die Matrix $T = MC$ mit ebenfalls standardnormalverteilten, aber korrelierten Zufallszahlen:

$$M \cdot C = \begin{pmatrix} -0,4326 & 0,1746 & -0,0956 \\ -1,6656 & -0,1867 & -0,8323 \\ 0,1253 & 0,7258 & 0,2944 \\ 0,2877 & -0,5883 & -1,3362 \\ -1,1465 & 2,1832 & 0,7143 \\ 1,1909 & -0,1364 & 1,6236 \\ 1,1892 & 0,1139 & -0,6918 \\ -0,0376 & 1,0668 & 0,8580 \\ 0,3273 & 0,0593 & 1,2540 \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0,3 & 0,5 \\ 0 & 0,9539 & 0,5766 \\ 0 & 0 & 0,6462 \end{pmatrix}$$

$$= T = \begin{pmatrix} -0,4326 & 0,0368 & -0,1774 \\ -1,6656 & -0,6778 & -1,4783 \\ 0,1253 & 0,7300 & 0,6714 \\ 0,2877 & -0,4749 & -1,0588 \\ -1,1465 & 1,7387 & 1,1471 \\ 1,1909 & 0,2272 & 1,5660 \\ 1,1892 & 0,4654 & 0,2132 \\ -0,0376 & 1,0063 & 1,1507 \\ 0,3273 & 0,1547 & 1,0082 \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Die unabhängigen, standardnormalverteilten Zufallszahlen aus M , die mit der Methode in Abschnitt 4.3.2.2 erzeugt werden können, lassen sich mit diesem Vorgehen in standardnormalverteilte Zufallszahlen T mit der gewünschten Korrelation ρ_{X_1, \dots, X_k} umwandeln.

Sollen die Zufallsvariablen beliebige Verteilungen aufweisen können, funktioniert das obige Verfahren nicht mehr. Denn nur für elliptische Verteilungen¹³ genügt die Angabe einer Korrelationsmatrix¹⁴. Um eine möglichst gute „Annäherung“ an die gewünschte lineare Korrelation für beliebige Verteilungen zweier Zufallsvariablen X_1 und X_2 zu erreichen, werden diese in der Iman-Conover-Methode so sortiert, dass der Rang der Zahlen aus X_1, X_2 genau dem Rang von Zufallszahlen T einer Standardnormalverteilung mit der gewünschten Korrelation entsprechen [IC82].

Das Verfahren benötigt als Eingabe die Verteilungsfunktionen von X_1 und X_2 sowie die gewünschte Ziel-Korrelationsmatrix ρ_{X_1, X_2} . Es umfasst folgende Schritte:

1. Generiere Matrix M mit n Zufallszahlen jeweils aus den Verteilungen von X_1 und X_2
2. Generiere Matrix T mit n Zufallszahlen aus einer bivariaten Standardnormalverteilung, die genau die gewünschte lineare Korrelation entsprechend ρ_{X_1, X_2} aufweisen¹⁵

¹³zu denen als prominenteste Vertreterin die Normalverteilung gehört

¹⁴vgl. dazu die Ausführungen zu Korrelation und Copulas in den Abschnitten 2.6.6.3 und 2.6.6.5

¹⁵In dem Verfahren wird noch eine Fehlerkorrektur vorgenommen, um Verzerrung aus nicht absolut unabhängigen Zufallszahlen zu eliminieren. Dazu wird mit $E = \frac{1}{n} \cdot M' M$ die tatsächliche Korrelationsmatrix

- Sortiere die Werte aus M so um, dass sie *die gleiche Rangreihenfolge* aufweisen wie die Zufallszahlen aus T

Der Vorteil ist, dass das Verfahren für korrekte Korrelationsmatrizen immer ein Ergebnis liefert. Der Nachteil ist, dass nicht mehr klar ist, wie die durch ρ als Eingabe vorgegebene Korrelation mit der tatsächlichen Korrelation ρ_{T_1, \dots, T_k} der erzeugten Zufallszahlen zusammenhängt. Je nach der Form der Randverteilungen X_i wird eine mehr oder weniger gute *Annäherung* an die gewünschte lineare Korrelation erreicht. Abgesehen davon können (wie in Abschnitt 2.6.6.3 erläutert) zwei unterschiedliche Mengen von Zufallszahlen die gleiche Korrelation und die gleichen Randverteilungen aufweisen, aber trotzdem eine sehr unterschiedliche Abhängigkeitsstruktur.

Das Iman-Conover Verfahren kommt auch in der Simulationssoftware „Crystal Ball 2000“ zum Einsatz.

4.3.2.4 Fazit zur Monte Carlo Simulation

Die Monte Carlo Simulation ist die flexibelste Lösung und hat sich mittlerweile zu einem Standardverfahren für die Aggregation unterschiedlicher Verlustverteilungen entwickelt. Bei der Anwendung von Simulationstechniken für die Aggregation ist es jedoch wichtig, zu verstehen, wie die einzelnen Verlustwerte ermittelt werden, die später die Ergebnisverteilung ausmachen. Gerade für die Modellierung von Abhängigkeiten zwischen Risiken ist die Erzeugung „korrelierter Zufallszahlen“ aus beliebigen Randverteilungen mittlerweile in der Praxis weit verbreitet, weshalb die Technik hier ausführlich dargestellt wurde. In Abschnitt 5.5 ab S. 61 wird ausführlicher auf die Modellierung von Abhängigkeiten eingegangen.

von M berechnet. Mit der Cholesky-Zerlegung wird aus E die obere Dreiecksmatrix F bestimmt mit $E = F'F$. Statt durch $T = MC$ werden die standardnormalverteilten Zufallszahlen dann durch $T = MF^{-1}C$ bestimmt [IC82, S. 44].

5. Methoden der Quantifizierung

Der Hauptgrund, warum sich die Risikomanagement-Techniken, die im Bereich von Marktrisiken und Kreditrisiken bisher entwickelt wurden, nicht direkt auf die Quantifizierung von Betriebsrisiken übertragen lassen, ist der Mangel an statistisch auswertbaren Daten über Verluste aus Betriebsrisiken. Eine Voraussetzung für die valide Aggregation von Risiken ist jedoch der Übergang von halbquantitativ beschriebenen Risiken zu vollständig quantifizierten Risiken. Dabei muss für jeden zu aggregierenden Verlust seine Auswirkung in einer einheitlichen Größe, zum Beispiel Gewinn vor Steuern, angegeben werden, damit die möglichen Verluste addierbar sind.

Quantitatives vs. qualitatives Risikomanagement?

Es wird häufig vorgebracht, dass viele Risiken nur qualitativ beschrieben werden könnten. Anhänger einer „wertorientierten Unternehmensführung“ argumentieren dagegen, dass nur in ihrer Ergebniswirkung beschreibbare Risiken gesteuert werden können [Gle04b, S. 358], und dass eine valide wertorientierte Aggregation mit schlechter Datenqualität immer noch besser ist als eine schlechte Methode mit ungenauen Daten. Beispiele sind zum Beispiel Risiken für „weiche“ Faktoren wie Mitarbeiterzufriedenheit oder Reputation, die sich kaum oder gar nicht messen lassen.

Einige Variablen lassen sich zwar in monetäre Verluste übersetzen, jedoch nur über mehrere Zwischenschritte. Zum Beispiel kann sich die Mitarbeiterzufriedenheit über die Produktivität und die Fehlerquote auf die Produktqualität auswirken, die sich später in tatsächlichem Wartungsaufwand oder Umsatzverlusten widerspiegelt. Eine solche Umrechnung müsste implizit durch den schätzenden Experten erfolgen, wenn die Angabe der Verlusthöhe in Geld für alle Risiken gefordert wird. Das ist nach menschlichem Ermessen häufig nicht zu leisten und nur mit Softwareunterstützung zu lösen (ein Ansatz in diese Richtung wird in den folgenden Abschnitten skizziert).

Es ist zu überlegen, ob mit Blick auf die Effizienz (Arbeitsbelastung für die Experten) und die Effektivität (Vollständigkeit des erfassten Risikospektrums) des Risikomanagementprozesses zumindest in einer Übergangsphase die qualitative oder halbquantitative Bewertung von Risiken weiter möglich bleiben sollte. Die nicht quantitativ beschriebenen Risiken würden in einer Aggregation allenfalls nachrichtlich ausgewiesen. Der Nachteil wäre, dass

eine verbesserte Datenqualität mit vollständig quantifizierten Einflüssen damit langfristig nicht durchgesetzt werden kann. Als Ausweg könnte vorgegeben werden, dass jedes qualitativ beschriebene Risiko einem quantitativen Risiko zugeordnet werden muss, das für eine Vielzahl von enthaltenen Risiken eine quantitative Schätzung bereitstellt. Damit würde unterhalb einer bestimmten Signifikanzschwelle auch die Aggregation nur durch Schätzung erfolgen. Diese Signifikanzschwelle könnte nach und nach gesenkt werden, sobald sich die quantitative Beschreibung von Risiken besser durchsetzt.

Die Quantifizierung kann sowohl bei den Verlusthöhen als auch bei den Eintrittswahrscheinlichkeiten verbessert werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist bereits in den halbquantitativen Methoden ein realistisches Maß, wenn sie als eine Zahl pro Risiko bezogen auf eine bestimmte Periode beschrieben wird. Die Angabe *bedingter* Wahrscheinlichkeiten kann hilfreich sein, um Risikoketten besser abzubilden.

5.1 Schätzung von Verlusthöhen-Verteilungen

Die Repräsentation der Verlusthöhe durch nur einen Wert ist deutlich unzulänglicher als die Angabe nur einer Wahrscheinlichkeit. Ein klassisches Beispiel ist die Betrachtung eines Brandes. Hier ist vom Papierkorbbrand bis zum kompletten Verlust eines Gebäudes jeder Schaden denkbar. Vorsorgemaßnahmen und Ursachen des Risikos sind dennoch ähnlich, so dass es sinnvoll erscheint, alle Arten von Bränden nur als ein Risiko zu beschreiben. Der Ausmaß des Verlusts sollte jedoch als Verteilungsfunktion angegeben werden können.

Übergang zu einer stochastischen Beschreibung der Verlusthöhen

Im einfachsten Fall ergibt sich aus der Angabe eines minimalen und eines maximalen Verlustwertes eine Gleichverteilung, wenn keine weiteren Informationen über die Wahrscheinlichkeit für *bestimmte* Verlusthöhen vorliegt. Dennoch ist diese Information durch Experten einfacher zu schätzen, als wenn sie sich auf nur einen Verlustwert festlegen müssen. Gleichzeitig ist auch der Informationsgehalt einer Gleichverteilung höher als der eines Einzelwerts, weshalb die Möglichkeit, zwei Punkte anzugeben immer noch eine Verbesserung der Risikoschätzungen darstellt.

5.1.1 Drei-Punkt-Schätzung

Eine weitere Verbesserung kann durch die Angabe eines weiteren Wertes für die *wahrscheinlichste* Verlusthöhe erreicht werden. Mit der minimalen und maximalen Verlusthöhe ergibt sich daraus eine Dreiecksverteilung, die in vielen Fällen eine bessere Abschätzung der tatsächlichen Verteilung der Verlusthöhen um den wahrscheinlichsten Wert erlaubt.

Ein zulässiger Einwand lautet, dass in der Wirklichkeit keine Risiken existieren, deren Verluste sich durch Dreiecksverteilungen exakt beschreiben lassen. In der Literatur über operationelle Risiken werden Verteilungen wie die gemischte Normalverteilung (ein Beispiel ist in Abbildung 2.2 gezeigt), Lognormalverteilung (vgl. ebenfalls Abbildung 2.2), Gamma-Verteilung, Student-t-Verteilung oder Weibull-Verteilung vorgeschlagen [RMF05, S. 81]. Diese Verteilungen unterscheiden sich zum Beispiel von der Normalverteilung dadurch, dass sie entweder mehr Wahrscheinlichkeitsmasse an den Rändern besitzen (engl.: „fat tails“, s. Abschnitt 2.6.4.4) und/oder (rechts-)schief sind (s. Abschnitt 2.6.4.3). Damit kann die Eigenschaft von Betriebsrisiken modelliert werden, dass vielen kleinen Verlusten auch einige seltene hohe Verluste gegenüberstehen.

Der wichtige Unterschied liegt jedoch darin, dass mit diesen Verteilungen immer bereits das *aggregierte* Risiko beschrieben wird. In einem Ansatz, der zunächst Einzelrisiken schätzt und danach z. B. durch Simulation aggregiert, ergibt sich die Form der aggregierten Verteilung unabhängig von der Form der Verteilungen der Einzelrisiken. Es kann sich durch die Aggregation auch eine rechtsschiefe Verteilung mit hohen Einzelverlusten ergeben, obwohl alle Einzelrisiken durch symmetrische Dreiecksverteilungen (oder sogar durch diskrete Verteilungen) beschrieben wurden.

Dieser Effekt soll an einem Beispiel verdeutlicht werden. Mit Hilfe der Software „Crystal Ball 2000“ wurde eine Monte Carlo-Simulation von 7 beispielhaften Einzelrisiken, die alle durch symmetrische Dreiecksverteilungen sowie eine Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben werden, durchgeführt. In jedem Simulationslauf entscheidet die Eintrittswahrscheinlichkeit darüber, ob ein Verlust aus dem jeweiligen Risiko in das Summenrisiko eingeht. Falls ja, wird die Verlusthöhe aus der symmetrischen Dreiecksverteilung gezogen. Der Gesamtverlust wird 10 000 mal für alle sieben Risiken unter der Annahme der Unabhängigkeit der einzelnen Risiken ermittelt. Die addierten Werte bilden die Gesamtverlustverteilung, die in Abbildung 5.1 zu sehen ist. Die verwendeten Werte der Einzelrisiken stehen in Tabelle 5.1.

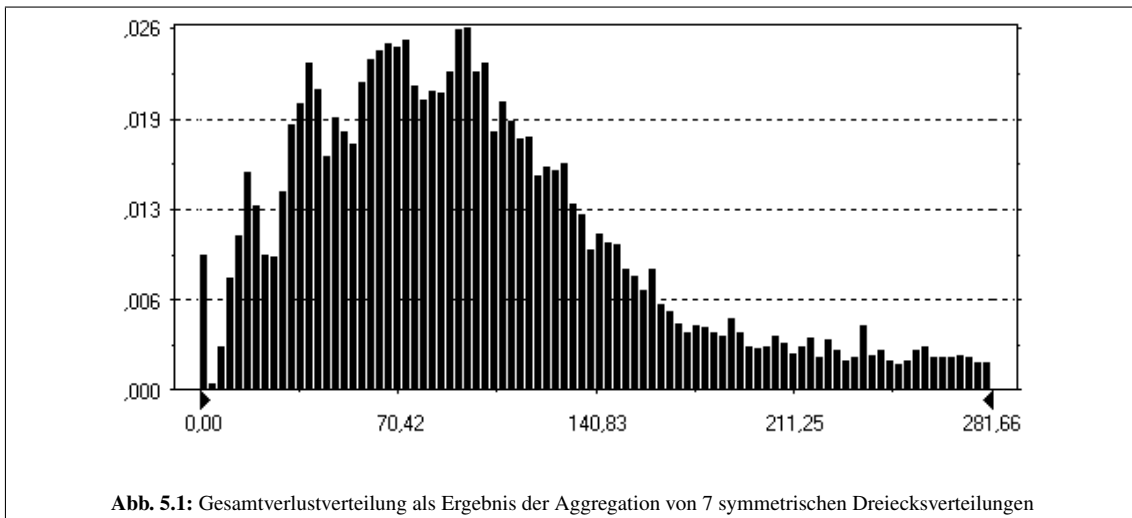


Abb. 5.1: Gesamtverlustverteilung als Ergebnis der Aggregation von 7 symmetrischen Dreiecksverteilungen

Nr.	Δ : min	Δ : mod	Δ : max	P
1	5	15	25	80 %
2	10	20	30	60 %
3	15	25	35	50 %
4	25	35	45	40 %
5	40	50	60	35 %
6	50	60	70	30 %
7	130	170	210	10 %

Tab. 5.1: Sieben fiktive Einzelrisiken, deren Verlusthöhe jeweils durch symmetrische Dreiecksverteilungen mit den angegebenen Minimal-, Modal- und Maximalwerten spezifiziert ist

Die Risiken 1 bis 6 aus Tabelle 5.1 stellen den Hauptanteil der Risiken mit vergleichsweise kleineren Schäden. Risiko 7 repräsentiert die höheren Verluste, die seltener vorkommen. Im aggregierten Gesamtergebnis ergibt sich die Annäherung an eine rechtsschiefe Verteilung mit überdurchschnittlich viel Wahrscheinlichkeitsmasse am Ende („fat tail“). Wie man

sieht kann durch die Simulationsmethode auf eine Verteilungsannahme für die *aggregierte* Verlustverteilung verzichtet werden.

5.1.2 Wahl von parametrischen Verteilungen und Schätzung der Parameter

Viele stochastische Verteilungen lassen sich durch die Angabe weniger Parameter vollständig spezifizieren. Dabei sagen die gebräuchlichsten Parameter etwas über die Lage und die Streuung der Werte aus. Beispiele für Verteilungen, die durch zwei Parameter vollständig beschrieben werden, sind die Normal-, Extremwert-, Gamma-, logistische und Lognormalverteilung. Eine Normalverteilung lässt sich beispielsweise durch die Angabe von Erwartungswert μ und Standardabweichung σ vollständig bestimmen.

Weitere Parameter können etwas über die Form der Verteilung aussagen. Die schiefe Normalverteilung wird beispielsweise durch die Angabe je eines Parameters zu Lage, Streuung und Form vorgegeben. Die Weibullverteilung besitzt keinen Lageparameter, aber einen Form- und einen Streuungsparameter.

Eine Zusammenfassung der Parameter und Dichtefunktionen verschiedener Verteilungen findet sich z. B. bei Rachev et al. [RMF05, S. 51–52].

Eine alternative Möglichkeit, eine Verteilung mit n Parametern zu spezifizieren, besteht darin, n Quantile der Verteilungsfunktion anzugeben und daraus die gesuchten Parameter zu berechnen. Das erleichtert die Schätzung durch Experten, weil sich die Frage nach dem α -Quantil einer Verlustverteilung wie folgt umformulieren lässt: „Welche Verlusthöhe wird im Fall, dass das Risiko eintritt, in α % der Fälle nicht überschritten?“. Für eine Normalverteilung könnten zum Beispiel das 50-%- und das 90-%-Quantil erfragt werden. Gegenüber der Frage nach Erwartungswert und Standardabweichung ist diese Frage wohl einfacher zu beantworten. Die Voraussetzung ist in allen Fällen jedoch, dass die Art der Verteilung vorher festgelegt wird. Die Wahl der Verteilung kann bei der Angabe der gleichen Quantile zu sehr unterschiedlichen Resultaten führen.

Mit Hilfe solcher bekannter Verteilungen lässt sich die wahre Verteilung der Verluste eines Risikos sehr gut annähern. Das Problem liegt bei der Schätzung von Verteilungen darin, dass bei der Schätzung von möglichen Verlusten durch Experten keine ausreichenden Informationen über die Art oder die Form der Verteilung vorliegen. Die Wahl einer Verteilung kann auf der Grundlage historischer Daten erfolgen, indem die Güte der Annäherung einer Verteilung mit einem Test wie dem Kolmogorov-Smirnov- oder dem Chi-Quadrat-Anpassungstest gemessen wird. Jedoch liegen keine ausreichenden historischen Daten vor, so dass höchstens die Wahl einer Verteilung unter Berücksichtigung des den Verlusten zugrunde liegenden Prozesses in Frage kommt.

Der Gewinn an Genauigkeit in einer Aggregation durch die Verwendung einer parametrischen Verteilung ist im Vergleich zum Mehraufwand gegenüber der Angabe einer Dreiecksverteilung für die Verlusthöhen in den meisten Fällen nicht zu rechtfertigen. Das hängt jedoch auch davon ab, wie gut sich die tatsächliche Verteilung mit einer Dreiecksverteilung annähern lässt. Für den Fall, dass bei einem wichtigen Einzelrisiko ausreichende Informationen vorliegen, um eine genauere Aussage über die wahrscheinliche Verteilung der Verluste zu treffen, sollte jedoch die Angabe einer parametrischen Verteilung unterstützt werden.

5.2 Einheitliche Risikodefinition

Es existiert eine große Bandbreite von Betriebsrisiken (Operationellen Risiken). Preisschwankungen können ebenso als Risiko angesehen werden wie Naturkatastrophen oder Fehlverhalten der eigenen Mitarbeiter. Für eine konsistente Identifikation und Bewertung der unterschiedlichen Risiken muss deshalb eine genaue Risikodefinition der Ausgangspunkt sein.

Dazu gehört eine einheitliche Bezugsgröße, relativ zu der die Höhe eines Risikos gemessen werden kann. Ein Referenzrahmen, der z. B. von der Deutschen Telekom bzw. von Vattenfall Europe genutzt wird, ist die mögliche Veränderung des Ergebnisses (EBIT bzw. EBITDA) einer Geschäftseinheit durch ein Ereignis. Die Höhe des Risikos kann auch als Abweichung vom Planwert gemessen werden. Dabei werden die möglichen Antwortstrategien (Responses), ihre Kosten und Auswirkung auf die Risikohöhe bereits berücksichtigt.

Durch das Kriterium der Ergebniswirksamkeit wird gleichzeitig abgegrenzt, was überhaupt als Risiko betrachtet wird. Beispielweise der Totalverlust einer bereits abgeschriebenen Anlage wäre nur dann ergebniswirksam, wenn erwartet werden kann, dass eine Ersatzinvestition fällig wird. Ein Reputationsverlust aufgrund einer Indiskretion wird dann ergebniswirksam, wenn zu erwarten ist, dass dadurch Aufträge verloren gehen.

In einem zielorientierten Risikomanagement sollte die Quantifizierung in der gleichen Einheit erfolgen, in der auch die Ziele gemessen werden. Über Ursache-Wirkungs-Ketten muss dann die Auswirkung eines Risikoereignisses so lange „weitergereicht“ und dabei umgerechnet werden, bis ein monetäres Ziel betroffen ist, so dass ein korrespondierendes Risiko erstellt wird, das in Geldeinheiten geschätzt wird. Die monetären Risiken können anschließend auch für die Aggregationsrechnungen herangezogen werden; dazu muss allerdings sichergestellt sein, dass alle monetären Risiken in der gleichen Einheit geschätzt werden (z. B. dürfen Umsatz- und Ergebnisrisiken nicht gemischt werden, vgl. [Gle04b, S. 354]).

5.3 Sammlung historischer Verlustdaten

Für das Management von operationellen Risiken in Kreditinstituten werden zunehmend Verlustereignisdatenbanken angelegt, in denen erlittene Verluste aus operationellen Risiken historisiert werden. Diese Entwicklung hängt vor allem mit dem Baseler Akkord über die Eigenkapitalanforderungen für Kreditinstitute zusammen, dessen Umsetzung Anfang 2007 in der Europäischen Union in Kraft treten soll. Dort heißt es für Banken, die den fortgeschrittenen Messansatz (Advanced Measurement Approach, AMA) für operationelle Risiken anwenden möchten [Bas04, TZ 670]:

Banken müssen interne Verlustdaten entsprechend den in diesem Abschnitt enthaltenen Regelungen sammeln. Die Sammlung interner Verlustdaten ist eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung und das Funktionieren eines zuverlässigen Messsystems für operationelle Risiken. Interne Verlustdaten sind entscheidend für die Verknüpfung bankeigener Risikoschätzungen mit ihrer tatsächlichen Verlusterfahrung. Dies kann durch eine Reihe von Verfahren erreicht werden, u.a. durch die Verwendung interner Verlustdaten als Grundlage für empirische Risikoschätzungen, als Mittel zur Validierung

der Eingangs- und Ausgangsdaten eines bankeigenen Risikomesssystems oder als Verknüpfung von Verlusterfahrung und Risikomanagement sowie Kontrollentscheidungen.

Der wichtigste Grund für diese Mindestanforderung ist wohl, dass das von dem jeweiligen Kreditinstitut vorzuhaltende Eigenkapital (das wiederum mit Opportunitätskosten belegt ist) letztlich von der Höhe der geschätzten Risiken abhängt. Damit besteht ein Anreiz für die Bank, ihre Risiken systematisch zu unterschätzen. Historische Verlustdaten sind vergleichsweise gut überprüfbar und damit der einfachste Ansatz für Bankenaufsicht und Wirtschaftsprüfer, die Risikoschätzungen zu validieren.

Die SAP AG ist als Industrieunternehmen nicht an derartig detaillierte Vorschriften gebunden. Die Entscheidung über die Sammlung von Verlustdaten kann also nach einer betriebswirtschaftlichen Analyse der Kosten und des Nutzens gefällt werden. Bei diesen Überlegungen muss auch berücksichtigt werden, ob und wo auch hier Anreize für systematische Unter- oder Überschätzungen von Risiko bestehen, denen durch die Verlustdatensammlung entgegengewirkt werden kann.

5.3.1 Schwierigkeiten bei der Verwendung historischer Verlustdaten

Das größte Problem bei der Risikoschätzung auf der Grundlage historischer Daten ist die Annahme, dass vergangene Verluste ein Indikator für zukünftige Verluste sind. Risiken werden grundsätzlich zukunftsorientiert beschrieben. Die Steuerung von Risiken auf der Grundlage von Vergangenheitswerten birgt die Gefahr, dass nicht schnell genug auf eine verbesserte oder verschlechterte Lage des Unternehmens reagiert werden kann. Durch die „Rückspiegel-Perspektive“ werden geänderte Trends oder veränderte Kontrollstrukturen als Reaktion auf erlittene Verluste nicht widergespiegelt [Wie04, S. 237]. Gerade wenn neue Produkte und Technologien entwickelt werden existieren keine historischen Daten, die ein Vorhersage zukünftiger Risiken zulassen [Mun04, S. 362].

Hinzu kommt die Schwierigkeit, dass selbst in einer umfangreichen Verlustdatenbank extreme Verluste nicht in repräsentativem Umfang enthalten sind [FGR01, S. 11]. Als Gegenmittel werden im Bankbereich Datenkonsortien (z. B. die Operational Riskdata eXchange Association ORX¹) gebildet, in denen manche Banken anonymisierte Verlustereignisse nach einer festgelegten Struktur austauschen. Das Problem mit diesem Vorgehen ist, dass die Verluste anderer Banken nichts über die eigene Risikostruktur aussagen; eine Bank mit gutem operationellem Risikomanagement wird tendenziell dafür „bestraft“, dass andere Banken zum Beispiel aufgrund fehlerhafter Kontrollstrukturen häufiger Verluste erleiden. Außerdem müssen die Verlustwerte in der Höhe angepasst werden, um zwischen Kreditinstituten unterschiedlicher Größe vergleichbar zu sein. Dieser Anpassungsbedarf führt dazu, dass die Daten fast wieder zufälligen Charakter erhalten und nicht viel über die tatsächlichen Risiken aussagen. Im Übrigen ist die Bankbranche wesentlich homogener als die Softwarebranche, wo zusätzlich davon auszugehen ist, dass kein Unternehmen bereit wäre, seine Risikoinformationen (auch nicht anonymisiert) mit Konkurrenten zu teilen.

5.3.2 Datenstruktur von Verlustdaten

Schadensfälle sind Ausprägungen eingetretener Risiken. Es reicht jedoch nicht aus, bestehende Risiken in der Anwendung ORM auf den Status „eingetreten“ („Occurred“) zu

¹<http://www.orx.org>

setzen und sie ggf. mit einer tatsächlichen Verlusthöhe zu versehen. Dieses Vorgehen berücksichtigt nicht die Möglichkeit, dass zu einem Risiko mehrere Schadensfälle eintreten können, die möglicherweise zeitlich gestaffelt sind. Die Bezifferung eines Schadens ist aber häufig erst lange nach dem Schadensereignis möglich und erfordert dann eine genauere Beschreibung. Dazu sollten Schadensfälle separat beschreibbar sein und sich in Kategorien einordnen lassen. Auch, um „Dauerrisiken“ (z. B. Abwicklungsfehler in täglichen Prozessen) abzubilden, sollte eine separate Entität für Schadensfälle geschaffen werden.

Schadensfälle sollten sich dennoch auf ein zugrunde liegendes Risiko beziehen. Damit wird einerseits die Risikobewertung unterstützt und validiert, andererseits können die Schadensfälle die Klassifizierungsmerkmale ihres Risikos übernehmen und so zugeordnet und gefiltert werden (Ausführungen zur Klassifikation der Risiken finden sich an Abschnitt 4.1).

Die Möglichkeit, Verlustereignisse zu erfassen, die kein zugehöriges Risiko haben, birgt die Gefahr, dass die Zuordnung nur aus Gründen der Zeitersparnis nicht erfolgt. Bleiben Verlustereignisse ohne zugehöriges Risiko jedoch die Ausnahme, lässt sich automatisch nach Versäumnissen im Risikomanagement suchen: für völlig unvorhergesehene Verlustereignisse sollte sich gut begründen lassen, weshalb das zugehörige Risiko vorher nicht gesehen oder warum es nicht erfasst wurde. In bestimmten Fällen kann die pflichtweise Erstellung eines Verlustereignisses vorgeschrieben werden, zum Beispiel bei Vertragsstrafen, deutlichen Terminverfehlungen, Qualitätsmängeln, die zu Eskalationen führen oder bei außerordentlichen Abschreibungen. Dazu muss aber deutlich gemacht werden, dass weder durch eine Risikoschätzung noch durch die Aufzeichnung eines Verlustereignisses eine Schuldzuweisung erfolgt, und diese Daten müssen entsprechend differenziert betrachtet werden. Die Kontrolle bezieht sich in diesem Fall nur darauf, ob ein ausreichendes Risikomanagement betrieben wurde — unabhängig von der Urheberschaft der Risiken.

5.3.3 Quantifizierung von Verlusten

Die Angabe eines monetären Werts, der nach einem festgelegten Maßstab (z. B. EBIT) ermittelt wird, gestaltet sich bei tatsächlich eingetretenen Verlustereignissen teilweise einfacher als bei Risiken. Wenn eine Bezugsgröße aus dem Rechnungswesen gewählt wird und das Schadensereignis gut abgrenzbar ist, kann die Quantifizierung in enger Anlehnung an diese bestehenden Daten erfolgen. Bei vielen Verlustereignissen ergeben sich aber die gleichen Probleme wie bei der Quantifizierung von Risiken. Es existieren auch hier komplexe Ereignisse ohne direkt messbaren Schaden - zum Beispiel Projektverzögerungen, die durch interne Ressourcenumschichtung ausgeglichen werden oder Ereignisse, die durch Reputationsverluste möglicherweise zu geringeren Marktanteilen führen. Als Auswege bietet sich entweder an, eine bestmögliche Quantifizierung zu erzwingen und mit möglicherweise ungenauen Angaben zu arbeiten, oder die nur qualitative Beschreibung von Schäden zu ermöglichen.

Beim Aufbau einer längerfristigen Schadenhistorie ist außerdem zu berücksichtigen, dass monetäre Werte aus der Vergangenheit aufgezinnt werden müssen, um Inflationseffekte zu kompensieren [Wie04, S. 242].

5.4 Der Weg zu einem integrierten Chancen- und Risikomanagement

Die Methode der getrennten Modellierung von Eintritt und Verlusthöhe der Risiken stammt aus der Versicherungsmathematik. Bei Versicherungen werden ausschließlich Einzelfallereignisse betrachtet. Im Bereich von Geschäftsrisiken gibt es jedoch den Fall, dass ein Risiko als negative Abweichung von einem Planwert aus der Verteilung $F(x)$ der möglichen Ergebnisse (unter oder über dem Planwert) abgeleitet werden soll. Solche Verteilungen können zum Beispiel für das Betriebsergebnis eines kleinen Teilbereichs, für ein Vertriebsziel oder im Bereich von Markt- oder Währungsrisiken vorliegen.

Die Angabe einer Eintrittswahrscheinlichkeit kann in diesem Fall nur mit einem Rückgriff auf die Risikodefinition als Abweichung von einem Planwert erfolgen². Weil $F(x)$ als Verteilungsfunktion die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein Ergebnis $\leq x$ erzielt wird, ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für eine negative Abweichung direkt gegeben durch $F(x_{Plan})$. Die Verteilung über die Verlusthöhe entspricht der bei x_{Plan} abgeschnittenen und skalierten Verteilung $F(x')$ ³, weil nur noch die negativen Planabweichungen betrachtet werden.

Bei der beschriebenen Vorgehensweise drängen sich zwei Fragen auf:

1. Warum sollen die Informationen, die in der ursprünglichen Verteilung Ergebnisse beschreiben, die über dem Planwert liegen, für das Risikomanagement außer Acht gelassen werden?
2. Warum sollte ein künstliches Ereignis „Unterschreitung des Planwerts“ konstruiert werden, nur um eine Beschreibung in Form von zwei Verteilungen (für Eintritt und Verlust) vornehmen zu können?

Zu 1 lässt sich sagen, dass die positive Seite von Risiken, also die Chancen, eine ebenso große Rolle spielen müssen wie die negativen Abweichungen, sobald im Rahmen einer Aggregation Effekte wie Diversifikation und Wechselwirkungen betrachtet werden. Der Diversifikationseffekt innerhalb der einzelnen Risiken, der daher rührt, dass in einer realistischen Situation nie alle Risiken gleichzeitig auftreten, ist verhältnismäßig gering gegenüber dem Diversifikationseffekt unter Berücksichtigung von Chancen. Eine Begründung für die Existenz von Konzernen ist, dass die Diversifikation ihnen erlaubt, in bestimmten Bereichen größere Risiken einzugehen und für überschaubare Zeiträume auch dort erlittene Verluste durch andere Bereiche auszugleichen, wenn am Ende dieser Periode eine große Chance steht. Eine reine Steuerung nach der Risikohöhe, aber auch eine Steuerung unter Berücksichtigung von Risiko und aktuellem Ertrag, könnte hier zu unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit falschen Entscheidungen führen. Kennzeichen eines integrierten Chancen- und Risikomanagements ist es also, positive wie negative *zukünftige* Entwicklungen zu bewerten.

²Dieser Planwert muss nicht notwendigerweise dem Median oder dem arithmetischen Mittel der Ergebnisfunktion $f(x)$ entsprechen.

³Die Skalierung erfolgt in zwei Schritten: zunächst wird $x_{Plan} = 0$ gesetzt, und die Ergebnisskala wird so verschoben, dass jedes Ergebnis unter x_{Plan} negativ ist, d. h. $x^* = x - x_{Plan}$. Danach werden die Wahrscheinlichkeiten angepasst, so dass $F(x_{max}^*) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x^*)$ wieder 1 ergibt.

Besonders deutlich wird diese Notwendigkeit, wenn für das Gesamtunternehmen neutrale Entwicklungen in ihre Bestandteile zerlegt werden, und nur der negative Teil im Risikomanagement behandelt wird. Als bei der SAP sicher nicht seltenes Beispiel können zwei Entwicklungsprojekte genannt werden, die teilweise von den gleichen Personalressourcen abhängig sind. Es sei nun denkbar, dass sich der Projektstart in dem einem Projekt verzögern könnte, was sich dort als Risiko niederschlägt. Dadurch stehen dem anderen Projekt aber die von beiden benötigten Ressourcen exklusiv zur Verfügung, was eindeutig eine Chance für das zweite Projekt ist, weil diese Entwicklung bei der Planung nicht vorausgesetzt werden darf. Ein anderes Beispiel betrifft die Bereiche Festnetz und Mobilfunk eines integrierten Telekommunikationskonzerns⁴. Die Möglichkeit, dass viele Kunden ihren Festnetzanschluss zugunsten eines Mobilfunkangebots kündigen, ist ein Risiko für den Festnetzbereich, aber eine große Chance für den Mobilfunkbereich. Eine ausschließliche Fokussierung auf die Risiken würde hier die tatsächliche Auswirkung auf den Konzern zu negativ darstellen und (bei blinder Anwendung der Erkenntnisse) sogar zu Risikomanagementmaßnahmen führen, die der Mobilfunktochter mehr schaden, als sie der Festnetztochter nutzen.

Zu 2 ist festzustellen, dass eine Verteilung möglicher Ergebnisse immer bereits eine Aggregation vieler denkbarer (negativer und im Unterschied zu einer aggregierten Risikoverteilung auch positiver) Einzelereignisse darstellt. Das Ereignis „Überschreitung des Planwerts“ ist eigentlich nach der Risikomanagementmethodik kein gültiges Ereignis, denn es enthält keinerlei Informationen über die Gründe, sondern nur über die Auswirkungen. Ein korrekt beschriebenes Risiko enthält aber sowohl Informationen über die Hintergründe („Condition“) als auch über die Auswirkungen. Um die Gründe darzustellen, müsste die Aggregatverteilung wieder in ihre Bestandteile zerlegt werden, und nur die Einzelrisiken dürften betrachtet werden. Ohne auch Chancen als Einzelereignisse zu berücksichtigen, lässt sich die ursprüngliche Verteilung daraus jedoch nicht mehr durch Aggregation bestimmen.

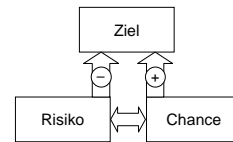


Abb. 5.2: Beziehung Ziel-Risiko-Chance

Wie Risiken und Chancen mit Zielen zusammenhängen, ist in Abbildung 5.2 gezeigt: Risiko und Chance sind zwei Seiten der selben Medaille – nämlich der Unsicherheit der Zukunft. Risiken können Ziele negativ beeinflussen, weil bei Eintritt eines Risikos Ziele verfehlt zu werden drohen. Chancen dagegen befördern das Erreichen der Ziele.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in einem integrierten Chancen- und Risikomanagement drei Arten von Informationen als Ausgangspunkt der Aggregation unterstützt werden sollten:

<i>Information</i>	<i>Beschreibung durch</i>
1. Einzelrisiko	Verlusthöheverteilung und Eintrittswahrscheinlichkeit
2. Einzelchance	Gewinnhöheverteilung und Eintrittswahrscheinlichkeit
3. Planverteilung	Mögliche Ergebniswirkung (+/-); Eintritt: sicher

Tab. 5.2: Mögliche Risikobeschreibungen in einem integrierten Chancen- und Risikomanagement

In einem reinen Risikomanagementansatz werden nur Einzelrisiken betrachtet. Die Möglichkeit, Planverteilungen anzugeben, ist eine Voraussetzung für die Einbeziehung anderer

⁴Dieses Beispiel ist dem Corporate Risk Management der Deutschen Telekom AG entliehen.

Modelle und Informationsquellen, deren innerer Aufbau nicht bekannt sein muss, und die nicht notwendigerweise als Risikomanagementmodelle entwickelt wurden (vgl. dazu: 5.4.1).

5.4.1 Einbeziehen weiterer Informationsquellen

Wann immer Planungs- und Modellierungssysteme Ausgaben nicht nur in Form eines wahrscheinlichsten Wertes, sondern in Form einer Verteilung möglicher Werte generieren, kommt die Ausgabe des jeweiligen Systems prinzipiell als Input für die Risikoaggregation in Frage. Wird kein integriertes Chancen- und Risikomanagement, sondern reines Risikomanagement betrieben (vgl. dazu Abschnitt 5.4), so wird zusätzlich der singuläre Planwert benötigt, um das Risiko als Abweichung von diesem Planwert bestimmen zu können.

Zum Beispiel im Treasury existieren bereits Risikomanagementsysteme, deren Output teilweise in Form von Verteilungen über mögliche Schadenshöhen bzw. über mögliche Ergebnisbeiträge als stochastischer Input für die globale Risikoaggregation dienen könnte⁵. Das operative Risikomanagement steht aber eindeutig mehr im Fokus der globalen Risikomanagementaktivitäten als das Management finanzieller Risiken, so dass die Einbindung operativer Planungs- und Informationssysteme von größerer Bedeutung wäre.

Langfristig erscheint es auf dem Weg zu einem integrierten Chancen- und Risikomanagement als wünschenswert, dass alle Planungsprozesse im Unternehmen mit den Begriffen von möglichen Entwicklungen argumentieren. Anstatt singuläre Planwerte zu liefern, würden dann Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Ergebnisse angegeben. Diese können nach der beschriebenen Methode auch für Risikoschätzungen verwendet werden.

5.5 Behandlung von Risikoketten und Korrelationen

Eine mathematische Definition der Begriffe *Unabhängigkeit* und *Korrelation* wurde in den Abschnitten 2.6.6.3 bzw. 2.6.7 gegeben. Wegen der großen Bedeutung der unterschiedlichen Konzepte für eine Risikoaggregation soll vor der Behandlung der Modellierungsmöglichkeiten für Abhängigkeiten eine kurze Zusammenfassung der Unterschiede erfolgen.

Die Korrelation ist ein Maß für den linearen Zusammenhang zweier Variablen. Punkte, die auf einer Geraden liegen, sind zum Beispiel perfekt korreliert. Damit ist aber nichts über die Abhängigkeit der Variablen gesagt. Punkte auf der Normalparabel $y = x^2$ haben z. B. eine Korrelation von 0, aber y ist vollständig von x abhängig. Abhängigkeiten lassen sich durch die Angabe bedingter Wahrscheinlichkeiten ausdrücken. Die Schreibweise $P(B) \neq P(B|A)$ aus Abschnitt 2.6.7 besagt, dass sich die Wahrscheinlichkeit von $P(B)$ verändert, wenn $P(A)$ gegeben ist (und alles Andere irrelevant für $P(B)$ oder unverändert ist). Auch damit ist aber nichts darüber gesagt, ob ein ursächlicher Zusammenhang zwischen A und B besteht [Bol98, S. 109]. Kausalität wird später in Form von Bayes-Netzwerken eingeführt, die den Zusammenhängen zwischen den Variablen eine *Richtung* geben.

5.5.1 Aufsummieren des Value at Risk

Wird für mindestens zwei Entitäten per Monte Carlo Simulation ein gesamt-VaR bestimmt und werden diese Werte anschließend aufsummiert (wie z. B. von der Bankenaufsicht für

⁵Derzeit werden die Risiken aus dem Treasury mit einem singulären Wert im System ORM abgelegt.

die verschiedenen Bereiche einer Bank bei Verwendung des Verlustverteilungsansatzes gefordert), so entspricht dies einer angenommenen Korrelation von 1 der Risiken der unterschiedlichen Bereiche. Das entspricht der Annahme, dass keine Diversifikationseffekte zwischen den Risikokategorien auftreten.

5.5.2 Verwendung einer Korrelationsmatrix

In einer Monte Carlo Simulation werden Korrelationen meist durch die Erzeugung korrelierter Zufallszahlen simuliert (s. Abschnitt 4.3.2.3).

Die Bestimmung einer realistischen Korrelationsmatrix ist in der Praxis häufig nicht möglich, weil keine ausreichenden historischen Daten vorliegen, um die Korrelationen statistisch zu schätzen. Eine rein subjektive (Experten-)Schätzung von Korrelationskoeffizienten ist noch weniger intuitiv als die Schätzung von Wahrscheinlichkeiten. Um die Korrelation zweier Risiken beurteilen zu können, müsste ein Experte die wechselseitigen, positiven wie negativen Einflüsse verschiedener Risiken gegeneinander abwägen und aufrechnen können. Diese Aufgabe ist mit steigender Zahl von Einflussfaktoren jedoch zu komplex, um implizit von einem Menschen gelöst zu werden [GR05, S. 64–66]. Weitere praktische Probleme ergeben sich mit einer steigenden Zahl von Risiken, weil für das n -te Risiko $n-1$ Korrelationen geschätzt werden müssen. Andere Probleme können in nicht-linearen Korrelationen oder „correlation breakdowns“ in Phasen großer Veränderungen liegen.

Grundsätzlich müssen beim Einsatz einer Korrelationsmatrix die Verteilungen für die Eintrittshäufigkeiten der Schadensereignisse und die Verteilungen über die Schadenshöhen separat korreliert werden.

In der Praxis erfolgt beim Einsatz von Korrelationsmatrizen wegen der beschriebenen Probleme bei der subjektiven Schätzung manchmal eine Beschränkung auf die Werte 0 (Unabhängigkeit), 1 und -1. Die Interpretation einer vorgegebenen Korrelation von 1 (bzw. -1) bereitet einige Schwierigkeiten. Wie in Abschnitt 4.3.2.3 beschrieben, werden durch die Iman-Conover-Methode nur die Zufallszahlen so sortiert, dass ihr Rang dem Rang von Zufallszahlen einer Standardnormalverteilung mit der gewünschten Korrelationsmatrix entspricht.

Je nach Gestalt dieser Verteilungen sind die resultierenden Werte nicht in gleichem Maße korreliert. Eine Korrelation von 1 bei den resultierenden Verteilungen kann sich aus den korrelierten Zufallszahlen nur ergeben, wenn die Verteilungen die gleiche Form haben. Als Beispiel mögen die „Verteilungen“ für den Eintritt zweier Einzelereignisse A und B (nicht aber für das Ausmaß des Verlustes) dienen, mit $P(R_a) = 0,01$ und $P(R_b) = 0,99$. In der Korrelationsmatrix wird eine Korrelation von $\rho_{ab} = 1$ hinterlegt. In den Simulationsläufen treten aber nur in 1 % der Fälle R_a und R_b gleichzeitig ein; in weiteren 1 % der Fälle treten beide Risiken nicht ein. In 98 % der Fälle muss aber R_b eintreten, ohne dass R_a eintritt, weil sonst keine gesamte Wahrscheinlichkeit für R_b von 99 % erreicht wird. Die tatsächlich getroffene Annahme lautet in diesem Beispiel also nicht, dass beide Risiken immer gleichzeitig eintreten, sondern, dass wenn R_b eintritt, immer auch R_a eintritt, und wenn R_a nicht eintritt, auch R_b nicht eintritt. Die maximal sinnvoll anzugebende Korrelation zweier Randverteilungen ist also durch die Form der Verteilungen beschränkt [EMS99, S. 29]. Eine Verletzung dieser Vorgabe führt jedoch nur zu einer nicht eingängigen Abweichung des Korrelationskoeffizienten der Zielverteilung vom vorgegebenen Korrelationskoeffizienten. Eine Übertragung des Beispiels auf stetige

Verteilungen (zum Beispiel eine stark rechts- und eine stark linksschiefe Verteilung) ist möglich, jedoch nicht so anschaulich zu beschreiben.

Im Handbuch der Software Crystal Ball 2000 [Dec04, S. 237] wird vorgeschlagen, aus Performancegründen Korrelationen nahe 1 als direkte funktionale (man könnte sagen: kausale) Zusammenhänge zu modellieren. Wie gezeigt gibt es jedoch einen konzeptionellen Unterschied zwischen beiden Methoden. Die Erzeugung von korrelierten Zufallszahlen hat den Nachteil, dass die Laufzeit für die Transformation vieler Zufallszahlen sehr lang wird.

5.5.3 Würdigung der Korrelationsmethode

Durch eine graphische Darstellung einer einfachen Korrelationsmatrix sollen zwei Effekte im Zusammenhang mit der Verwendung von Korrelationsmatrizen verdeutlicht werden.

Der erste Effekt bezieht sich auf eine notwendige Eigenschaft gültiger Korrelationsmatrizen. Diese müssen positiv semidefinit sein, d. h. sie dürfen keine Eigenwerte < 0 haben. Durch ein einfaches Beispiel lässt sich eine unzulässige Korrelationsmatrix konstruieren.

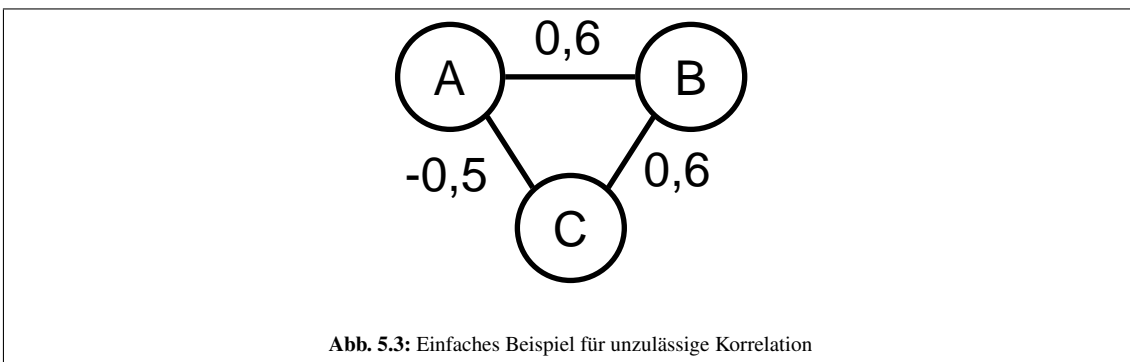


Abb. 5.3: Einfaches Beispiel für unzulässige Korrelation

Aus dem Beispiel lässt sich folgende „Korrelationsmatrix“ ablesen:

$$\begin{bmatrix} & A & B & C \\ A & 1 & 0,6 & -0,5 \\ B & 0,6 & 1 & 0,6 \\ C & -0,5 & 0,6 & 1 \end{bmatrix}$$

Die Eigenwerte dieser Matrix sind: $-0,135$, $1,500$ und $1,635$. Hier taucht ein negativer Eigenwert auf, damit ist die Matrix keine gültige Korrelationsmatrix. Das entspricht auch der Anschauung, denn wenn A mit B und B mit C positiv korreliert ist, kann A nicht mit C in gleichem Maße negativ korreliert sein. Je größer eine Korrelationsmatrix wird, desto schwieriger werden diese Zusammenhänge jedoch zu überblicken, wenn die Korrelationsmatrix nur durch Schätzung gefüllt wird.

Ein zweiter Effekt wird auch in dem Graph deutlich: Es werden nur ungerichtete Zusammenhänge modelliert. Zum Beispiel lässt sich für die Ereignisse $B :=$ „Blitzschlag“ und $F :=$ „Feuer“ nur ausdrücken, dass ein positiver Zusammenhang besteht. Es wird keine Information darüber abgelegt, ob ein Blitz einschlägt, weil es brennt, oder umgekehrt. Beide Ereignisse werden bei dem oben beschriebenen Vorgehen separat modelliert, so dass auch bei einer Korrelation von 1 die beiden Ereignisse ihre gesamte Häufigkeit nicht verändern. In dem Fall, dass sich die Blitzschlagwahrscheinlichkeit z. B. aufgrund des Klimawandels verdoppelt, würden weiterhin gleich viele Brände angenommen. Das Beispiel

zeigt also, dass es nicht ausreicht, zwei abhängige Ereignisse mit einer Korrelation zu versehen. Es muss auch bei jeder Veränderung eines Ereignisses überprüft werden, ob sich die Ursprungsverteilung der damit zusammenhängenden Ereignisse geändert haben.

Wegen der Ungerichtetheit der Verbindungen gibt es auch keine Hilfestellung darüber, welche abhängigen Ereignisse bei der Aktualisierung vernachlässigt werden können; würde in dem Beispiel durch die Installation eines Blitzableiters die Brandwahrscheinlichkeit gesenkt, müsste vom Modellstandpunkt trotzdem geprüft werden, ob sich die Häufigkeit der Blitze verändert hat. Nach der Feststellung, dass die Blitze weiterhin so häufig einschlagen wie vorher, müsste wahrscheinlich noch die Korrelation entsprechend angepasst werden. Bei sehr vielen zusammenhängenden Risiken ist eine solche Aktualisierung nicht mehr zu leisten, weil bei jeder Änderung eines Risikos sämtliche verbundenen Risiken und die Korrelationskoeffizienten überprüft werden müssten.

5.5.4 Verwendung von Copulas zur Modellierung von Abhängigkeiten

Selbst wenn das oben beschriebene Grundproblem gelöst werden kann, eine realistische Korrelationsmatrix und zwei (oder mehr) Randverteilungen zu schätzen und jeweils aktuell zu halten, gibt es weitere Nachteile bei der Modellierung von Abhängigkeiten mit dem Konzept der Korrelation.

Eines der größten Probleme ist, dass sich aus zwei beliebigen Randverteilungen und einer gültigen Korrelationsmatrix keine eindeutige gemeinsame Verteilung bestimmen lässt, sobald die Randverteilungen nicht mehr die Form einer Normalverteilung (oder allgemeiner: einer elliptischen Verteilung) besitzen. Embrechts et al. [EMS99, S.21–23] zeigen, dass sich aus zwei Randverteilungen (zum Beispiel in Form einer Gammaverteilung) zwei unterschiedliche multivariate Verteilungen erzeugen lassen, die zwar die gleiche Korrelation aufweisen, wo jedoch in der einen multivariaten Verteilung extreme Verlustwerte der Randverteilungen häufiger gemeinsam auftreten als in der anderen Verteilung. Dieser Fall ist gerade im Risikomanagement von großer Bedeutung.

Als Ausweg wird in der neueren Literatur häufig an der unabhängigen Modellierung der Einzelverluste durch Randverteilungen festgehalten [Gla03, S. 147 ff.]. Der Zusammenhang der Randverteilungen wird aber durch die Angabe einer „Copulafunktion“ (vgl. Abschnitt 2.6.6.5) eindeutig spezifiziert.

5.5.4.1 Kritische Würdigung von Copulas und Korrelationsmatrizen

Der Einsatz von Copulafunktionen zur Beschreibung von Abhängigkeiten ist der Modellierung mit einer Korrelationsmatrix vorzuziehen, sobald aus nicht elliptisch verteilten Zufallsvariablen (s. Abschnitt 2.6.6.4) eine gemeinsame multivariate Verteilung zu bestimmen ist (für die Integration von Copulas in einer Monte Carlo Simulation vgl. Glauser [Gla03, S. 147–149]). Ansonsten besteht die Gefahr, dass das Gesamtrisiko unterschätzt wird, wenn extreme Werte der Randverteilungen häufig gemeinsam auftreten und dies in der Modellierung des Zusammenhangs nicht berücksichtigt wird.

Einige zentrale Nachteile sind aber beiden Modellierungsmethoden gemein. So ist die Bestimmung einer geeigneten Copula genau wie die Bestimmung eines Korrelationskoeffizienten ohne ausreichende historische Daten im Grunde unmöglich. Im Anwendungsbereich der SAP AG liegen aber, wie in Abschnitt 5.3 ausgeführt, keine ausreichenden empirischen

Daten über Verlustereignisse vor, und in vielen Bereichen erscheint eine solche Sammlung auch zukünftig nicht als machbar bzw. als wünschenswert. Für den Fall ausreichender Daten ist es auf jeden Fall schwieriger, aus diesen Daten eine Copula zu schätzen, als die Korrelationskoeffizienten zu berechnen [EMS99, S. 34].

Damit besteht auch an die Modellierung von Zusammenhängen die klare Anforderung, Expertenbewertungen als Datengrundlage zu nutzen. Werte, die von Menschen geschätzt werden müssen, sollten sich jedoch möglichst nah an den menschlichen Denk- und Erfahrungsmustern orientieren. Weder Korrelationskoeffizienten noch Copulafunktionen gehören zu den täglich verwendeten Größen der betrieblichen Planung und erfüllen diese Anforderung deshalb nicht. Werden sie dennoch in diesem Zusammenhang verwendet und ohne auswertbare Datenmengen geschätzt, steigt die Möglichkeit von falschen Ergebnissen als Folge einer unrealistischen Schätzung von Korrelationen oder der Wahl einer falschen Copula. Diese Fehlschätzung stellt ein eigenes Modellrisiko dar, das sich bei mehreren Tausend Risiken (wie bei der SAP), die meist keine ausreichende Datenbasis haben, nicht mit realistischem Aufwand ausschließen lässt.

Es ist im bivariaten Fall, in dem die Verteilungsfunktionen zweier Risiken verknüpft werden sollen, eventuell noch möglich, für eine Copula (oder einen Korrelationskoeffizienten) eine grobe, subjektive Schätzung vorzunehmen. Im multivariaten Fall (mit mehr als zwei Risiken) wird diese Aufgabe jedoch zunehmend komplex (vgl. dazu die in Abschnitt 5.5.3 beschriebene Anforderung einer positiv semidefiniten Korrelationsmatrix bzw. zu multivariaten Copulas [Ne199, S. 179]). Diese Schwierigkeiten lassen das skizzierte Vorgehen endgültig als unpraktikabel erscheinen.

Embrechts et al. [EMS99, S. 29] schlagen als Alternative vor, „eine direkte Schätzung der multivariaten Verteilung zu versuchen“. Übertragen auf das Thema der Risikoaggregation hieße das, dass jedes Aggregatrisiko einzeln geschätzt wird, ohne die enthaltenen Einzelrisiken zu berücksichtigen. Das Thema der Arbeit ließe sich nach diesem Vorschlag pointiert mit einem Satz beantworten: „Risikoaggregation findet unter Berücksichtigung aller Abhängigkeiten im Geiste statt“, was aber nicht einmal dem Status quo entspricht und eine Kapitulation vor der Komplexität der zu modellierenden Zusammenhänge darstellen würde. Weniger zugespitzt lässt sich festhalten, dass die zitierte Aussage auf die bereits in der Einleitung aufgeworfene Frage zielt, mit welchem Detaillierungsgrad die zu aggregierenden Risikoentitäten zu bilden sind.

Sicherlich ist es nicht notwendig, den Zusammenhang zwischen allen Risiken vollständig zu erfassen, um eine sinnvolle Prognose über das zukünftig mögliche Ausmaß der Risiken zu treffen. In Besinnung auf die Ziele des Risikomanagements genügt die Verknüpfung der größten Risiken mit den augenscheinlichsten Abhängigkeiten, um bestimmte Verbundeffekte („Clusterrisiken“) zu erfassen, die tatsächlich bestandsbedrohend sein können.

5.5.5 Kausalität im Risikomanagement

Das Konzept der Kausalität, also die Frage nach Ursache und Wirkung, ist eines der zentralen und umstrittensten Themen der Wissenschaftsgeschichte (vgl. dazu den Exkurs in [Pea88, S. 331-359]). In der Statistik ist das Konzept der Kausalität bis auf die Testtheorie (im Zusammenhang mit randomisierten, kontrollierten Experimenten) nicht vertreten. Wenn für zwei Ereignisse eine statistische Korrelation gemessen wird, ist keine Aussage darüber möglich, ob ein Ereignis das andere bedingt oder ob beide Ereignisse von weiteren

Faktoren abhängen. Für die Modellbildung soll das Problem auf die Frage reduziert werden, ob die Modellierung von Kausalität die Bewertung von Risiken verbessern kann oder nicht.

Entsprechend dem obigen Beispiel von Blitz und Feuer lautet die Frage: ist es intuitiver, zunächst die Ereignisse „Blitzschlag“ und „Feuer“ unabhängig voneinander zu bewerten und dann den Grad anzugeben, zu dem beide gemeinsam auftreten, oder entspricht es eher den menschlichen Denkmustern, zunächst die Abhängigkeitsstruktur zu analysieren, dann die in dem betrachteten Modell als ursächlich angenommenen Ereignisse zu modellieren und zuletzt die abhängigen Ereignisse als durch ihre Ursachen bedingte Ereignisse zu schätzen? Letzteres Vorgehen entspricht, zumindest für die Dimension der Eintrittswahrscheinlichkeit, dem Verfahren zur Erstellung eines Bayes-Netzwerkes (vgl. 5.5.6). Die Modellierung der Schadenshöhen für den Fall, dass ein Ereignis eintritt, kann und muss getrennt davon erfolgen [KN03, S. 4].

5.5.6 Bayes-Netzwerke

Die getrennte Modellierung von Randverteilungen und deren Abhängigkeitsstruktur erweist sich, wie in Abschnitt 5.5.4.1 erläutert, als sehr komplex oder (im Fall der Verwendung von Korrelationsmatrizen) als potenziell falsch. Als Alternative zu diesem Ansatz wird von Law und Kelton [LK00, S. 479–480] die Verwendung bedingter Verteilungen vorgeschlagen, um einen Zufallsvektor $X = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ mit abhängigen Komponenten zu erzeugen.

Das allgemeine Vorgehen setzt voraus, dass für jede Zufallsvariable $X_i, i = 2, 3, \dots, d$ die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung von X_i gegeben $X_j = x_j, j = 1, 2, \dots, i - 1$ bekannt ist, die als $F_i(x_i|x_1, x_2, \dots, x_{i-1})$ geschrieben wird. Bezeichne $F(X_i)$ die (unbedingte) Randverteilung von X_i . Dann lässt sich ein Zufallsvektor X mit der gemeinsamen Verteilungsfunktion $F(X_1), F(X_2), \dots, F(X_d)$ theoretisch wie folgt erzeugen:

1. Generiere x_1 aus der Verteilungsfunktion $F(X_1)$
 2. Generiere x_2 aus der Verteilungsfunktion $F(X_2|x_1)$
 3. Generiere x_3 aus der Verteilungsfunktion $F(X_3|x_1, x_2)$
 - ...
 - d. Generiere x_d aus der Verteilungsfunktion $F(X_d|x_1, x_2, \dots, x_{d-1})$
- d + 1. Gib $X = (x_1, x_2, \dots, x_d)$ zurück.

Nachdem dieser Algorithmus bei Law und Kelton [LK00, S. 479] vorgeschlagen wird, wird er sofort wieder als unpraktikabel verworfen, weil er die vollständige Spezifikation aller Randverteilungen und aller denkbaren bedingter Verteilungen erfordert, was ein extrem hoher Aufwand wäre.

Ein Ausweg bietet sich jedoch an: Bayes-Netzwerke. Deren Notation erlaubt es, durch die Einführung einiger zusätzlicher Annahmen über die (Un-)abhängigkeit von Zufallsvariablen eine komplette gemeinsame Verteilungsfunktion mit geringem Aufwand anzugeben.

Ein Bayes-Netzwerk enthält die folgenden Elemente mit folgenden Merkmalen [Jen01, S. 19] (Eine formale Definition für Bayes-Netzwerke findet sich bei Pearl [Pea88, S. 119]):

1. Eine Menge von Variablen (Knoten) und eine Menge von gerichteten Kanten zwischen den Variablen
2. Jede Variable besitzt eine endliche Menge von überlappungsfreien Zuständen
3. Die Variablen bilden zusammen mit den gerichteten Kanten einen gerichteten, zyklensfreien Graphen
4. Für jede Variable A mit den Elternknoten B_1, \dots, B_n ist die bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(A|B_1, \dots, B_n)$ hinterlegt.

5.5.6.1 Entwicklung eines einfachen Beispielnetzes

Die praktische Bedeutung jedes dieser Punkte für das Risikomanagement soll im Folgenden erläutert werden.

Die Knoten aus Punkt 1 können in einem Bayes-Netzwerk grundsätzlich sowohl für Risikoereignisse (z. B. Blitzschlag) oder Risikowirkungen (z. B. Elektronikschaden oder Feuer) stehen. Die gerichteten Kanten sind Pfeile, die jeweils eine *Ursache* mit ihrer *Wirkung* verbinden. Die Wirkung muss aber nicht ausschließlich von den angegebenen Ursachen abhängen. Die in 2 erwähnten Zustände können im einfachsten Fall binär sein - für Risiken also die Zustände „tritt ein“ und „tritt nicht ein“. Wie wir später sehen werden, ist es aus Gründen der Übersichtlichkeit ratsam, die Zahl der möglichen Zustände möglichst gering zu halten. Aussage 3 bedeutet, dass kein Ereignis seine eigene Wahrscheinlichkeit beeinflussen darf, auch nicht über mehrere Zwischenereignisse. Der zentrale Part von Bayes-Netzwerken ist jedoch die Angabe von *bedingten Wahrscheinlichkeiten*. Bei dem Beispiel von Blitz und Feuer kann eine Ursache-Wirkungs-Beziehung vom Blitz zum Feuer konstruiert werden: das Ereignis Blitzschlag verändert grundsätzlich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Feuer. Umgekehrt ist das jedoch nicht der Fall, was durch die Richtung des Pfeils (von Blitzschlag zu Feuer) ausgedrückt wird. Man beachte, dass Blitze nicht die einzige Ursache für Feuer sind. Diese Tatsache findet bei der Angabe der bedingten Wahrscheinlichkeiten Berücksichtigung, weil ja auch der Kombination „kein Blitz, aber Feuer“ eine positive Wahrscheinlichkeit zugeordnet wird. Da der Blitzschlag keine eigens modellierten Ursachen hat, wird dafür (wie bisher auch) nur die unbedingte Wahrscheinlichkeit jedes Zustands angegeben (z. B.: Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Blitzschlags: 5 %). Für das Ereignis *Feuer* werden jedoch zwei Werte geschätzt: die Wahrscheinlichkeit für Feuer, *gegeben dass* ein Blitzschlag eintrifft (die als höher angenommen wird), und die Wahrscheinlichkeit für Feuer *sonst*. (Eigentlich werden vier Werte geschätzt; dadurch, dass die Wahrscheinlichkeit des Gegenereignisses „kein Feuer“ jedoch eins minus die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses ist, muss jeweils nur ein Wert angegeben werden.) Die Wahrscheinlichkeitsverteilung von *Feuer* heißt *bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilung*, weil sie vom Zustand des weiteren Ereignisses „Blitzschlag“ abhängig ist. In Tabelle 5.3 und Abbildung 5.4 ist das obige Beispiel veranschaulicht. Das Ereignis „Wasserschaden“ wurde bereits als mögliche Folge eines Brandes hinzugefügt, um im folgenden Abschnitt 5.5.6.2 die Vorteile von Bayes-Netzwerken besser erläutern zu können.

5.5.6.2 Unterschiede zum Korrelationsmodell

Wie bereits erwähnt besteht in der Abbildung von Kausalität durch Bayes-Netzwerke ein fundamentaler Unterschied zu dem Konzept, das gemeinsame Verhalten von zwei

<i>Blitz</i>	<i>Wkt.</i>	<i>Feuer</i>	<i>Blitz</i>	<i>¬Blitz</i>	<i>Wasserschaden</i>	<i>Brand</i>	<i>¬Brand</i>
Blitzschlag	5 %	Brand	3 %	1 %	Wasserschaden	40 %	1 %
¬Blitz	95 %	¬Brand	97 %	99 %	¬W.schaden	60 %	99 %

Tab. 5.3: Wahrscheinlichkeiten für Blitz (unbedingt) und Feuer/Wasser (bedingt)

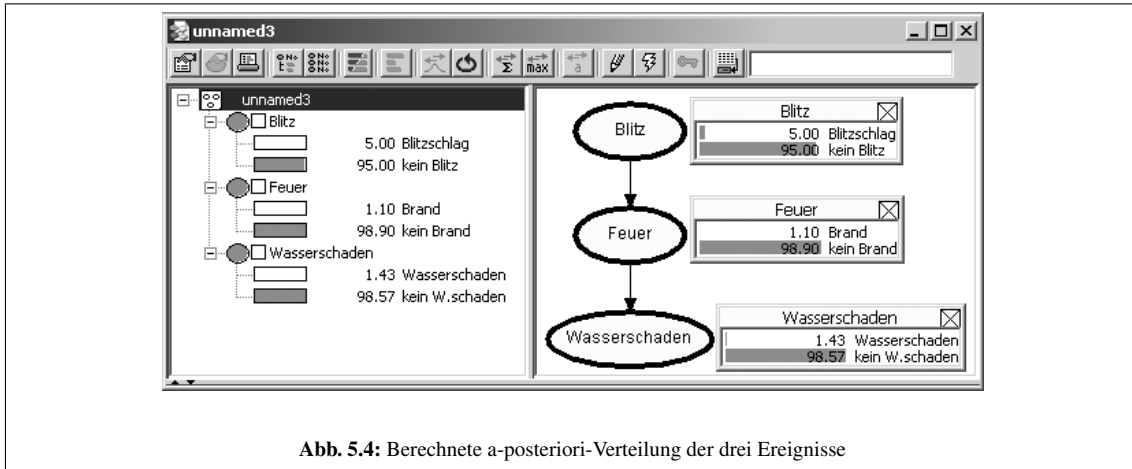


Abb. 5.4: Berechnete a-posteriori-Verteilung der drei Ereignisse

Variablen mit Hilfe von Korrelation abzubilden. Die Aussage, dass zwei Zufallsvariablen positiv korreliert sind, bedeutet nur, dass bei einer Simulation höhere Werte der einen Zufallsvariablen häufiger gemeinsam mit höheren Werten der anderen Zufallsvariablen gezogen werden. Zum Beispiel würde man auch im Korrelationsmodell eine positive Korrelation von Feuer und Blitzschlag modellieren. Im Ergebnis wird dann das Ereignis „Feuer“ häufiger „gezogen“, wenn auch „Blitzschlag“ gezogen wird. Damit ist die ungünstige Entwicklung, die durch das gemeinsame Auftreten unterschiedlicher Risiken entsteht, auch hinreichend gut abgebildet, denn aus dem Gesamtergebnis lässt sich ohnehin nicht mehr ablesen, ob ein Blitz ein Feuer verursacht hat oder vielleicht umgekehrt.

Die Schwäche dieses Ansatzes kommt spätestens dann zum Tragen, wenn sich eine Wahrscheinlichkeit ändert. Nehmen wir an, es lägen neue Informationen über die Gewitterhäufigkeit in einem Gebiet vor. Die Wahrscheinlichkeit für Blitzschlag wird entsprechend von 5 % auf 10 % angepasst. Im Korrelationsmodell ändert sich dadurch nichts an der gesamten Feuerwahrscheinlichkeit. Im Fall des Bayes-Netzwerks hat sich aber die gesamte Wahrscheinlichkeit für Feuer tatsächlich dadurch erhöht, dass sich die Wahrscheinlichkeit für einen Blitzschlag erhöht hat. Im Korrelationsmodell müsste jetzt die Wahrscheinlichkeit für Feuer angehoben werden, um die Lage wieder korrekt widerzuspiegeln. Die bedingte Formulierung im Bayes-Netzwerk erledigt diese Aktualisierung bereits „von selbst“.

Die Vorteile von Bayes-Netzwerken werden erst wirklich sichtbar, wenn die Zusammenhänge von mehr als zwei Ereignissen betrachtet werden. Dazu betrachten wir das dritte Ereignis „Wasserschaden“ (das in der Realität vermutlich aus praktischen Gründen als unabhängig von Feuerschäden behandelt werden sollte, unter Berücksichtigung der Löschwasserschäden direkt bei den Brandschäden). Es dürfte einleuchten, dass ein Blitz allein keinen Wasserschaden produzieren kann. Dafür hängen die Ereignisse Wasserschaden und Feuer aber zusammen, weil bei einem Brand große Schäden häufig erst durch Löschwasser entstehen. Im Korrelationsmodell würde man annehmen, dass Wasserschäden und Feuer positiv korreliert sind. Wenn nun ein Blitzschlag wahrscheinlicher wird, muss sowohl die Wahrscheinlichkeit für Feuer als auch die für einen Wasserschaden aktualisiert werden (und zwar jeweils im richtigen Verhältnis!). Im Bayes-Netzwerk erstellt man nur *eine* weitere

gerichtete Kante von Feuer zum Ereignis Wasserschaden und schätzt die Wahrscheinlichkeit für einen Wasserschaden gegeben Feuer (40 % im Beispiel), sowie für Wasserschäden sonst (1 %). Wenn nun die Wahrscheinlichkeit für Blitzschlag angehoben wird, muss sonst keine weitere Aktualisierung vorgenommen werden. Im Beispiel erhöht sich die Wahrscheinlichkeit für einen Wasserschaden von 1,43 % auf 1,47 % (vgl. Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5).

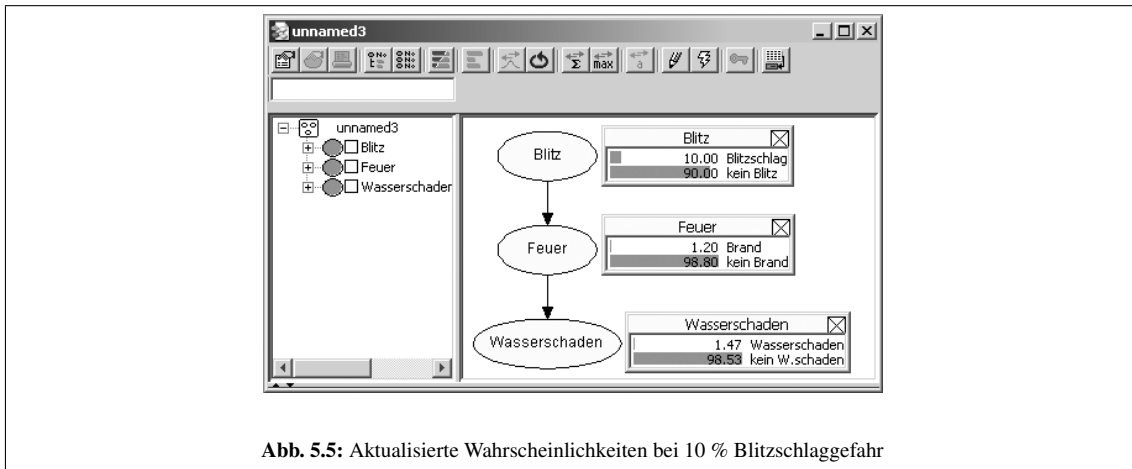


Abb. 5.5: Aktualisierte Wahrscheinlichkeiten bei 10 % Blitzschlaggefahr

Diese Arbeitersparnis basiert auf einer weiteren Annahme: Knoten, zwischen denen keine Kante verläuft, beeinflussen sich nicht direkt. Das heißt aber wie wir gesehen haben trotzdem nicht, dass Blitz und Wasserschaden unabhängig seien. Vielmehr ist die Abhängigkeit durch das Ereignis Feuer als Mittler aber hinreichend beschrieben. Anders im Korrelationsmodell: dort muss zwischen Blitz und Feuer, zwischen Feuer und Wasserschaden und auch zwischen Blitz und Wasserschaden (!) eine positive Korrelation eingetragen werden. Sollte man nun feststellen, dass Blitz und Feuer doch nicht so stark korreliert sind wie angenommen, muss auch die Korrelation von Blitz und Wasser entsprechend reduziert werden. Auch hier ist der Aktualisierungsaufwand im Bayes-Netzwerk geringer, weil nur *direkte* Abhängigkeiten explizit angegeben werden.

5.5.6.3 Grenzen von Bayes-Netzwerken

Die Vorteile von Bayes-Netzwerken gibt es nicht „kostenlos“. Auf zwei relevante Einschränkungen soll hier besonders hingewiesen werden. Die *erste* wurde bereits in Punkt 3 der Definition eines Bayes-Netzwerks erwähnt: der gebildete Graph muss zyklensfrei sein, das heißt, wenn man von einem beliebigen Knoten aus den Pfeilen folgt, darf man nie wieder zum Ausgangsknoten zurückkommen. Damit besteht beim Modellieren der Zwang, Ursachen und Wirkungen klar zu trennen. Mit den damit verbundenen Entscheidungen tun sich manche Menschen recht schwer; einige Beispiele: steigt der DAX, weil die Konjunktur anzieht, oder zieht die Konjunktur an, weil der DAX steigt? Ist eine Gruppe von Studenten motiviert, weil ihr Dozent motiviert ist, oder ist es eher umgekehrt?

An den Stellen, an denen ein solcher Zusammenhang als „Black Box“ betrachtet werden soll, weil zum Beispiel die betrachteten Faktoren unternehmensextern sind und sich keine Ursache-Wirkungs-Beziehung herstellen lässt, kann die Korrelationsmethode auch punktuell beim Ziehen der Eingabewerte für das Bayes-Netzwerk (also für die *unbedingten* Wahrscheinlichkeiten) verwendet werden. Damit kann die kausale „Bayes-Welt“ an ihrem Rand mit der statistischen „Korrelations-Welt“ kombiniert werden.

Viele Fehlkonzeptionen bei der Modellierung von Bayes-Netzwerken lassen sich vermeiden, wenn die Richtung „von der Ursache zur Wirkung“ den Modellierenden immer gegenwärtig ist. Als Merksatz formuliert Jensen in [Jen01, S. 43] folgenden Zusammenhang: Es sei eine Korrelation zwischen zwei Variablen A und B beobachtbar. Es ist aber schwierig, eine Pfeilrichtung festzulegen (d. h. zu bestimmen, was Ursache und was Wirkung ist). Wird der tatsächliche Zustand von A beobachtet, denn ändert sich auch die Annahme über das Auftreten von B und umgekehrt. In diesem Fall ist es hilfreich, sich vorzustellen, dass ein „externer Agent“ (eine höhere Macht) den Zustand der Variablen A „festhält“. Wenn sich dadurch die Annahme über den Zustand von B *nicht* verändert, dann ist A auch keine Ursache von B.

Dies soll an einem beliebigen Beispiel im Zusammenhang mit Bayes-Netzwerken erläutert werden: einer (beliebigen) Krankheit und ihrem zugehörigen Test. Im Alltagsgebrauch wird häufig folgende Richtung angenommen: Wenn der Test positiv ausfällt, dann ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Krankheit vorliegt. Damit würde der Pfeil vom Test zur Krankheit zeigen. In einem Bayes-Netzwerk sollte aber genau die umgekehrte Richtung modelliert werden, denn das positive Testergebnis löst nicht die Krankheit aus [Jen01, S. 36]. Diese Beziehung soll mit Hilfe des obigen Merksatzes untersucht werden. Würde der „externe Agent“ den Zustand des Tests fixieren, würde sich dadurch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Krankheit ändern? Da diese Frage zu verneinen ist, kann der Pfeil auch nicht vom Test zur Krankheit zeigen. Die Wahrscheinlichkeit des Testergebnisses würde sich aber verändern, wenn die Krankheit in einem Zustand fixiert würde. Deshalb ist die Krankheit die Ursache und der Test die Auswirkung. Eine solche Übung kann auch hilfreich sein, um den richtigen Ansatzpunkt für Risikomanagementmaßnahmen zu bestimmen und das sprichwörtliche „Herumdoktern“ an den Symptomen eines Risikos zu vermeiden. Damit wirkt sich die Forderung von Zyklensfreiheit vermutlich sogar positiv auf die Güte der gewonnenen Informationen aus.

Die *zweite* größere Einschränkung im Zusammenhang mit Bayes-Netzwerken ist die Tatsache, dass die meisten Techniken nur für *diskrete* Zufallsvariablen funktionieren oder im stetigen Fall nur für normalverteilte Zufallsvariablen erforscht sind [Jen01, S. 69]. Bei der Modellierung von *Risikoereignissen* ist das keine gravierende Einschränkung, denn hier gibt es meistens nur die Zustände „tritt ein“ bzw. „tritt nicht ein“. Die Risikoereignisse werden also durch eine binäre Zufallsvariable beschrieben; die Alternative wäre, wie im Korrelationsmodell auch, die möglichen Häufigkeiten des Ereignisses im Betrachtungszeitraum separat mit Wahrscheinlichkeiten zu hinterlegen, z. B. durch die Angabe einer Poissonverteilung. Für die Modellierung der *Risikowirkungen*, die in einer bestimmten Einheit (meist Geld) quantifiziert werden sollen, sind diskrete Verteilungen aber ungeeignet.

Die einfache Aussage: „die Verlusthöhe kann zwischen 1000 € und 2000 € liegen“ lässt sich zum Beispiel am besten durch eine (stetige) Gleichverteilung ausdrücken. Für eine Annäherung an eine stetige Verteilung wird die Bildung mehrerer Verlustklassen vorgeschlagen. In diesem Beispiel könnte man das Intervall [1000, 2000] zum Beispiel in fünf Klassen mit den Repräsentanten 1100, 1300, 1500, 1700 und 1900 als Zustände aufteilen, die jeweils die (unbedingte) Wahrscheinlichkeit von 20 % erhalten. Wie bereits oben

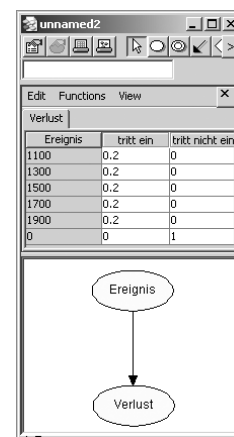


Abb. 5.6: Beispielverteilung

angemerkt sollte die Zahl der Zustände in einem Bayes-Netzwerk aber möglichst gering gehalten werden, weil sonst der Modellierungsaufwand überproportional steigt. Wäre das Verlustergebnis aus diesem Beispiel von nur einem Risikoereignis mit zwei Zuständen abhängig, müssten bereits 12 bedingte Wahrscheinlichkeiten angegeben werden – jeweils für den Zustand „Risikoereignis tritt ein“ bzw. „tritt nicht ein“ die Wahrscheinlichkeit für einen Verlust von 1100, 1300, 1500, 1700, 1900 oder 0.

5.5.6.4 Integration von Bayes-Netzwerk und Simulation

Bisher wurde noch nichts darüber gesagt, wie mit einem Bayes-Netzwerk Berechnungen durchgeführt werden können. Der übliche Ansatz zielt darauf, die vollständige a-posteriori-Verteilung für alle Ereignisse unter Berücksichtigung von bekannten Zuständen einzelner Variablen (engl.: „Evidence“) zu berechnen. In diesem Zusammenhang wird auch vom „Propagieren“ der Wahrscheinlichkeiten durch das Netz gesprochen [Jen00, S. 69]. Algorithmen dafür sind zum Beispiel der HUGIN-Algorithmus, der in der gleichnamigen Software zum Einsatz kommt⁶.

Das im Rahmen einer Simulation für das Risikomanagement zu lösende Grundproblem ist aber zunächst wesentlich einfacher. Hier muss nur in jedem Simulationslauf *eine* mögliche Kombination der Ereignisse entsprechend den hinterlegten (unbedingten und bedingten) Wahrscheinlichkeiten gezogen werden. Das entspricht dem stochastischen „Vorwärtsabtasten“ (engl.: „forward sampling“) eines Bayes-Netzwerks. Aufgrund der Zyklenfreiheit können alle Knoten des Netzwerks topologisch sortiert werden⁷. Entlang der topologischen Sortierung werden schließlich nacheinander die Realisierungen der einzelnen Variablen per Zufallsgenerator ermittelt⁸. Bei bedingten Verteilungen erfolgt das Ziehen nur anhand der Wahrscheinlichkeiten, die mit den in den Elternknoten gezogenen Realisierungen übereinstimmen. Beispielhaft ist in Abbildung 5.7 gezeigt, wie aus dem bekannten Beispiel nacheinander die Ereignisse „Blitzschlag“ aus $P(\text{Blitz})$, „Feuer“ aus $P(\text{Brand}|\text{Blitz})$ und „kein Wasserschaden“ aus $P(\text{Wasserschaden}|\text{Brand})$ gezogen werden. (Die Wahrscheinlichkeit, genau diese Kombination zu ziehen, beträgt laut Ausgabe von Hugin Lite 0,18 %.)

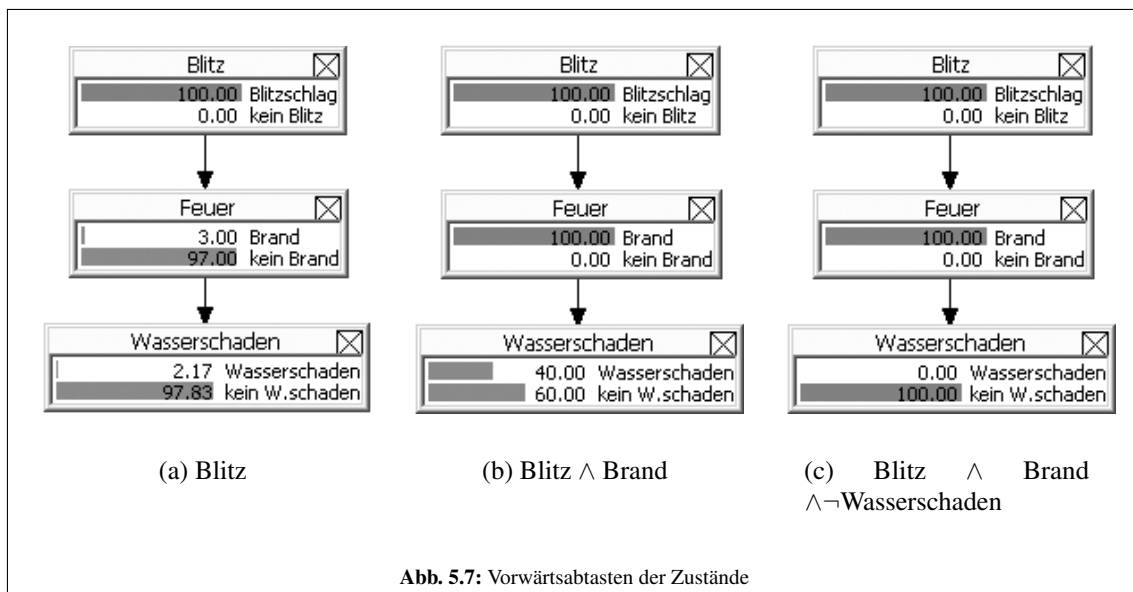
5.5.6.5 Bewertung: Bayes-Netzwerke für die Modellierung des Eintritts

Die vorgestellte Methode erlaubt die relativ intuitive Verknüpfung von Zusammenhängen der *Risikoereignisse*. Die Beantwortung von Fragen der Form: „Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt eines Wasserschadens im Falle eines Feuers, und wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit sonst?“ sind durch Experten einfacher zu beantworten als die Frage nach der unabhängigen Wahrscheinlichkeit jedes Ereignisses (unter impliziter Berücksichtigung aller Wechselwirkungen!) und anschließende Angabe der Korrelationsmatrix für alle Ereignisse. Gerade bei diskreten Verteilungen über die Eintrittswahrscheinlichkeit sind die Einschränkungen der *erreichbaren* Korrelation aus der Form der Verteilungen,

⁶Die Abbildungen über Bayes-Netzwerke in diesem Abschnitt wurden mit der Software Hugin Lite 6.6 erstellt.

⁷Da die topologische Sortierung in der Informatik als Standardverfahren gelten kann, wird hier auf eine Beschreibung verzichtet. Eine gute Beschreibung der topologischen Sortierung findet sich in der Wikipedia: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Topologische_Sortierung&oldid=12617530, Version vom 14.01.2006.

⁸Bei einem binären Ereignis X mit den Zuständen $X \in \{ja, nein\}$ und der Wahrscheinlichkeit p für ja kann eine $[0,1]$ -gleichverteilte Zufallszahl u in das Ereignis X umgerechnet werden, indem Zustand $X = ja$ ist, falls $u < p$ und $X = nein$ sonst.



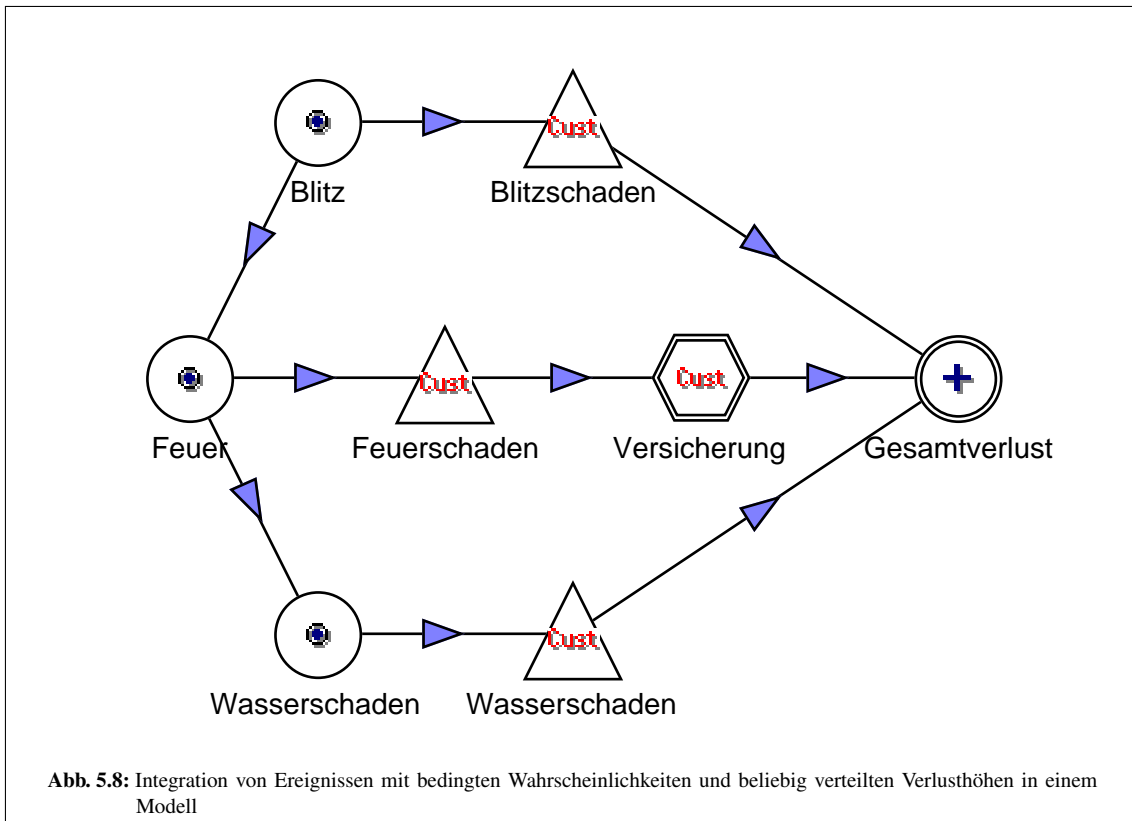
die in Abschnitt 5.5.2 beschrieben sind, besonders stark. Der beschriebene alternative Ansatz mit bedingten Wahrscheinlichkeiten erscheint deshalb für die Verknüpfung von Risikoereignissen als sinnvoller.

Generelle Vorteile der Modellierung von Abhängigkeiten zwischen Risikoereignissen mit einem Bayes-Netzwerk sind

- die bessere subjektive Schätzbarkeit bedingter Verteilungen gegenüber Korrelationskoeffizienten,
- der geringere Aufwand für Aktualisierungen nach einer Veränderung sowie
- die größere Transparenz über Ursachen und Wirkungen und damit verbesserte Analyse über lohnenswerte Risikomanagementaktivitäten.

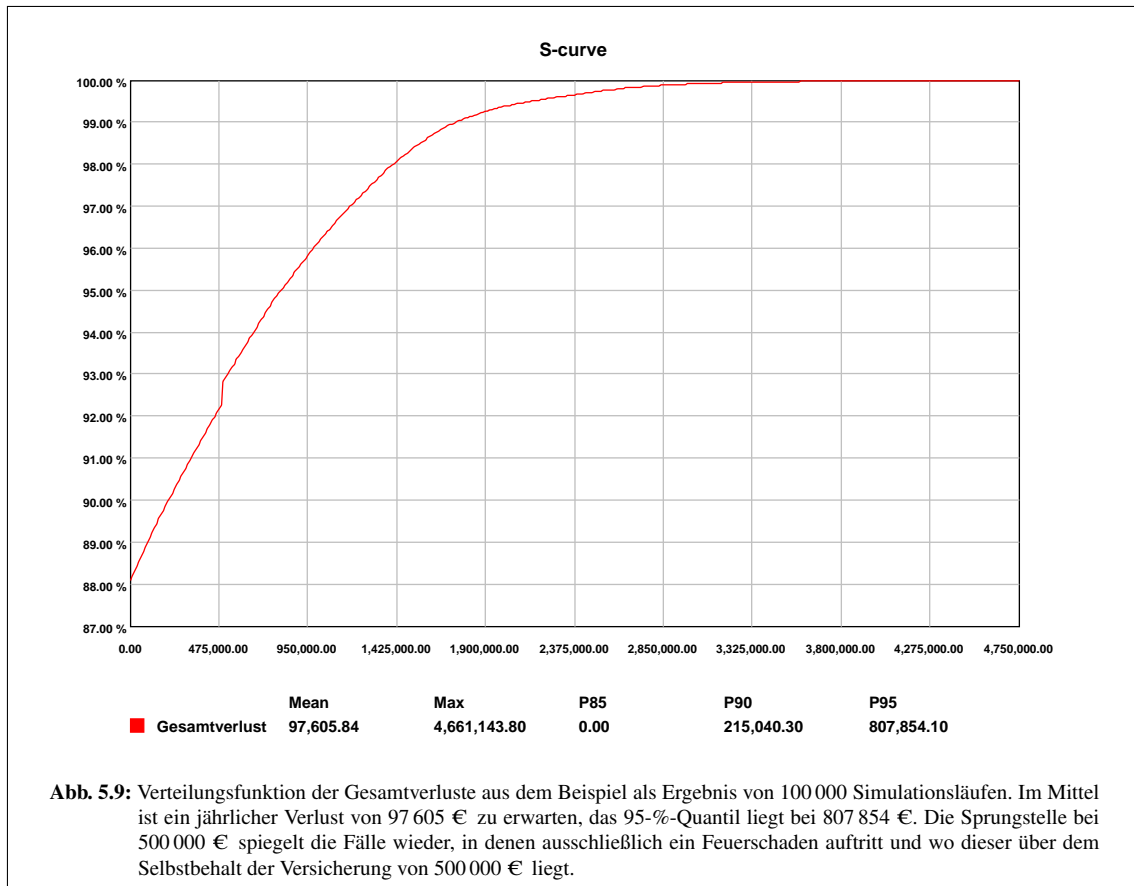
5.5.6.6 Einbeziehen von Verlusthöhen

Etwas anders ist die Situation für die Modellierung der Verlusthöhen. Wie bereits in Abschnitt 5.1 auf S. 53 ff. ausgeführt, ist die flexibelste und der Realität angemessenste Art der Quantifizierung der *Verlusthöhen* die Angabe einer (meist stetigen) Verteilungsfunktion. Wie Jensen [Jen01, S. 69] ausführt, dürfen in einem Bayes-Netzwerk diskrete Variablen keine stetigen Elternknoten haben; der umgekehrte Fall ist aber durchaus zulässig und handhabbar. Es ist einfach vorstellbar, jedem Zustand eines Risikoereignisses eine stetige Zufallsvariable zuzuordnen, die Informationen über die Verlusthöhe im jeweiligen Zustand enthält. Für das Ereignis „Feuer“ sollte dem Zustand „tritt nicht ein“ wohl ein Verlust von null zugeordnet werden, während der Zustand „tritt ein“ das Ziehen aus einer weiteren Verteilung auslösen sollte. Das könnte eine Dreiecksverteilung sein, die mit drei Schätzwerten für minimale, wahrscheinlichste und maximale Verlusthöhe die Ableitung eines konkreten Verlusts erlaubt. Der ggf. gezogene Verlust kann dann mit den im System modellierten Risikominderungsmaßnahmen behandelt werden, bevor der endgültig resultierende Wert entsprechend der vorher festgelegten Struktur in die Berechnung der Gesamtverlustverteilungen eingeht.



Das einfache Beispiel von oben wurde im Programm „Riscue 2.3b“ mit den entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Risikoereignisse (als runde Knoten) und zugehörigen Verlusthöhen (als dreieckige Knoten) modelliert (s. Abbildung 5.8). Für den Fall eines Brandes wird angenommen, dass zur Risikominderung eine Feuerversicherung (als sechseckiger Knoten) abgeschlossen wurde, die Schäden abdeckt, die über einem Selbstbehalt von 500 000 € liegen. Die Verlusthöhen (in den dreieckigen Knoten) der Ereignisse Blitz (B), Feuer (F) und Wasserschaden (W) wurden jeweils durch Dreiecksverteilungen mit den folgenden Minimal-, Modal- und Maximalwerten geschätzt: B:(0; 0; 2 000 000), F:(10 000; 500 000; 2 000 000), W:(100 000; 1 500 000; 3 000 000). Der Zeitrahmen für die Eintrittswahrscheinlichkeiten sei ein Jahr. Die Gesamtverlustverteilung ist in Abbildung 5.9 zu sehen.

Damit wird es möglich, ein abgeschlossenes, formal korrektes Bayes-Netzwerk für die Risikoereignisse mit beliebigen Schadenshöheverteilungen für die Verlusthöhen zu verbinden. Weil immer die Richtung vom Ereignis (der Ursache) zum Verlust (der Wirkung) eingehalten wird, gibt es auch keine Probleme mit den Einschränkungen von Bayes-Netzwerken hinsichtlich kontinuierlicher Variablen. Sicherlich besteht auch eine (umgekehrte) Rückkopplung von den eingetretenen Verlusten zu den Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse, wie sie in Abbildung 3.2 auf S. 24 eingezeichnet ist. Jedoch ist diese Rückkopplung nur über den zeitlichen Ablauf zu sehen; erst, wenn ein Ereignis eingetreten ist, werden häufig Maßnahmen getroffen, die die Eintrittswahrscheinlichkeit des ursprünglich auslösenden Ereignisses *in der Zukunft* verringern. Es sei jedoch daran erinnert, dass wie in Abschnitt 4.3.2 auf S. 45 begründet, in den betrachteten Simulationsmodellen jeweils nur *eine* Periode wiederholt simuliert wird (d. h. es findet eine statische Simulation, keine dynamische Simulation statt). Die Rückkopplungseffekte fließen idealerweise dadurch in die Berechnungen



ein, dass bei tatsächlichen Verlusten auch die wirklich getroffenen Maßnahmen in die zukünftigen Risikobeurteilungen einfließen.

Durch eine Kopplung der Verlusthöhen an die Risikoereignisse, die wiederum wegen der Angabe bedingter Wahrscheinlichkeiten abhängig sind, sind auch die gezogenen Verlustwerte abhängig. Die Verlustwerte weisen i. d. R. (aber nicht notwendig) auch eine Korrelation $\rho \neq 0$ auf. Im Fall, dass zwei Ereignisse gleichzeitig eintreten, sind deren *Verlusthöhen* aber weiterhin unabhängig, weil sie durch unabhängige Zufallszahlen aus der jeweiligen Verlustverteilung ermittelt werden. Um zum Beispiel die Situation zu modellieren, dass ein großer Brand meistens auch einen größeren Wasserschaden verursacht als ein kleiner Brand, gibt es zwei Möglichkeiten: entweder kann eine funktionale Abhängigkeit zwischen Feuerschaden und Wasserschaden hergestellt werden, oder die Zufallszahlen für die Ermittlung der Verlusthöhe jeweils von Feuerschaden und Wasserschaden können korreliert werden. Um zu entscheiden, welche Form der Modellierung im Einzelfall geeigneter ist, sollte überlegt werden, ob eine Kausalbeziehung für die Schadenshöhe hergestellt werden kann. In dem Beispiel ist es realistischer, dass die Höhe des Wasserschadens eine Variable der Höhe des Feuerschadens ist als umgekehrt.

Jedoch lässt sich die Verteilung $W:(100\,000; 1\,500\,000; 3\,000\,000)$ nicht als lineare Funktion von $F:(10\,000; 500\,000; 2\,000\,000)$ schreiben, weil die Verteilungen eine unterschiedliche Schiefe aufweisen. Wenn die Umrechnungsfunktion nicht zu kompliziert werden soll, muss entweder eine neue Verteilung für W gewählt werden, die sich aus einer linearen Transformation von F ergibt, oder es muss auf die Korrelationsmethode zurückgegriffen werden. Für große Risiken ist der einzige valide Weg, den Zusammenhang der Risiken weiter zu erforschen, sei es um die richtige Zusammenhangsfunktion oder eine realistische Korrelation zu bestimmen. Im Bereich subjektiver Expertenschätzungen von Verlusthöhen

erscheint die Angabe einfacher funktionaler Zusammenhänge aus den gleichen Gründen wie für die Bevorzugung bedingter Wahrscheinlichkeiten gegenüber Korrelationsmatrizen bei den Risikoereignissen als der beste Weg.

5.5.6.7 Fazit

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, wie das Korrelationsmodell mit bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Risikoereignisse und funktionalen Zusammenhängen für die Verlusthöhen erweitert werden kann, um kausale Zusammenhänge abzubilden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Reaktivität der verbundenen Ereignisse bei Änderungen in einem Ereignis. Gerade auch bereichsübergreifende Verkettungen von Risiken lassen sich so modellieren. Die Voraussetzung dafür ist jedoch, dass Risikoereignisse (mit diskreten Zuständen) von den Verlusthöhen (mit stetigen Verteilungen) getrennt werden. Für Bayes-Netzwerke bestehen weitere Anwendungsgebiete, die in Abschnitt 5.6.1 kurz vorgestellt werden. Ein Beispiel für ein abgegrenztes Modell eines bestimmten Bereichs, das ausschließlich auf Bayes-Netzwerken basiert, findet sich bei Cruz [Cru02].

5.6 Szenarioanalysen

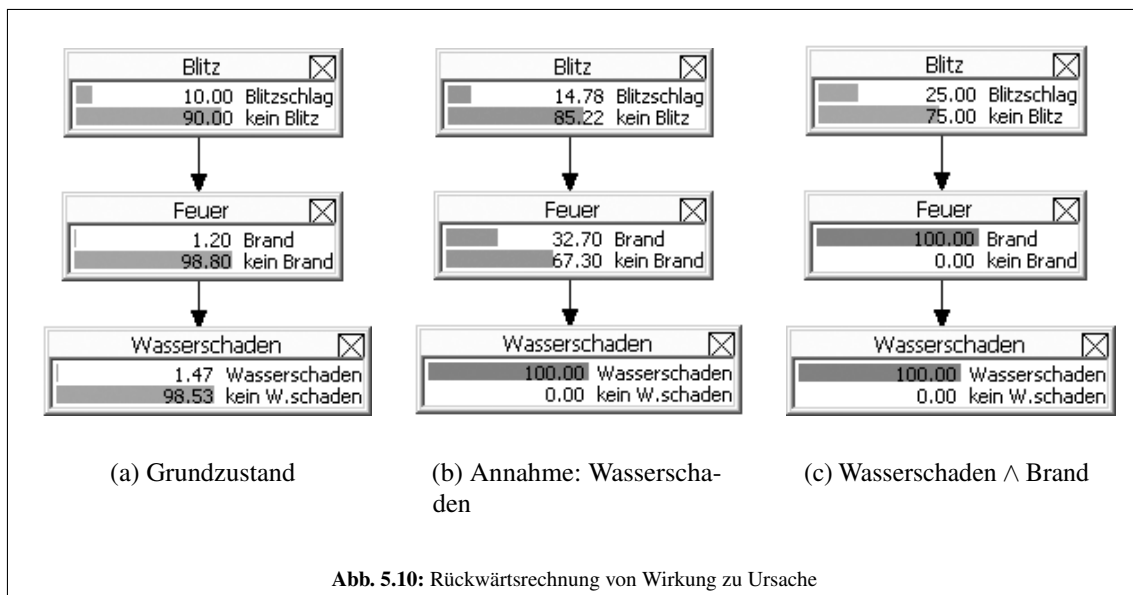
Wenn aus der Risikoanalyse konkrete Handlungsanweisungen für ein aktives Risikomanagement hergeleitet werden sollen, steht die Frage im Vordergrund, mit welchen Maßnahmen sich die Risikolage am effizientesten verbessern lässt. Das führt zu Fragen nach den Umständen, die zu großen Gesamtverlusten führen können. Um solche Konstellationen zu identifizieren, sollen zwei Techniken vorgestellt werden: Sensitivitätsanalysen einer Simulation und Aktualisierungen von Wahrscheinlichkeiten in einem Bayes-Netzwerk.

5.6.1 Szenarioanalyse in Bayes-Netzwerken

In Abschnitt 5.5.6 auf S. 66 ff. wurde bereits vorgestellt, wie sich ein Bayes-Netzwerk einsetzen lässt, um vorwärtsgerichtet Szenarien für eine Simulation zu erzeugen. Dabei wird ausschließlich in Richtung von den Ursachen zu den Wirkungen gerechnet. Aufgrund ihrer Struktur eignen sich Bayes-Netzwerke jedoch auch, um in umgekehrter Richtung zu rechnen: Eine Ergebniskonstellation wird vorgegeben, und mit Hilfe des Satzes von Bayes lässt sich von den Auswirkungen auf ihre wahrscheinlichsten Ursachen entsprechend dem Modell schließen (so genanntes *Belief Updating*). Die zugehörigen Algorithmen (z. B. der HUGIN-Algorithmus) können jedoch je nach Struktur des Netzes entweder sehr speicherplatz- oder rechenzeitintensiv sein. Entsprechende Softwarepakete wie z. B. Hugin funktionieren jedoch auch mit größeren Bayes-Netzwerken auf einem normalen PC, so dass dieses Problem heutzutage nicht mehr stark ins Gewicht fallen dürfte.

Beispiel für Ursachenforschung

Die Ursachenforschung soll an dem elementaren Beispiel aus Abschnitt 5.5.6.1 praktisch vorgeführt werden. In Abbildung 5.10 kann man verfolgen, wie sich die a-priori-Wahrscheinlichkeiten der Ursachen verändern, wenn bestimmte Auswirkungen als bekannte Tatsachen (engl.: *Evidence*) vorgegeben werden. Aus der Vorgabe des Ereignisses „Wasserschaden“ kann geschlossen werden, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Brand die Ursache ist, 32,7 % beträgt. Durch die höhere Wahrscheinlichkeit für das Ereignis Feuer hat sich auch die Wahrscheinlichkeit des Ereignisses Blitz von 10 % auf 14,78 % erhöht.



5.6.2 Sensitivitätsanalysen

Mit dem Begriff *Sensitivitätsanalyse* werden einige unterschiedliche Konzepte bezeichnet [SRTC05, S. 3]. Als „best practice“ kann es gelten, im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse die Frage zu betrachten, wie die Unsicherheit in den Ausgaben eines Modells auf die Unsicherheit der verschiedenen Eingaben zurückgeführt werden kann [HH05, S. 27–28]. Ein etwas anderes Verständnis findet sich zum Beispiel im Anhang der „Impact Assessment“-Methodik der EU-Kommission [Eur05, S. 44]:

Die Sensitivitätsanalyse untersucht, wie sich das Ergebnis eines Ablaufs in Reaktion auf Änderungen von Schlüsselparametern und deren Wechselwirkungen verändern würde.

Dort wird als Ziel einer Sensitivitätsanalyse vorgegeben, zu identifizieren, wie stark ein Parameter (z. B. die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses) steigen oder fallen müsste, um ein gewünschtes Ergebnis zu erzielen. Dazu müssen die wichtigsten Alternativen identifiziert werden und ein Umkehrpunkt/-wert gefunden werden.

Im Folgenden soll ein globaler, *modellfreier* (d. h. ohne weitere Annahmen über die Struktur des untersuchten Modells funktionierender), quantitativer Ansatz vorgestellt werden, der die Sensitivität entsprechend der ersten Definition als varianzbasiertes „Einflussmaß“ (engl.: importance measure) berechnet.

Gegeben sei ein beliebiges Modell, repräsentiert durch $Y = f(X)$; $X = (X_1, X_2, \dots, X_d)$ ist ein Vektor von d Eingabevariablen, Y ist ein Ausgabewert des Modells. Dabei kann Y entweder eine interessierende Größe (z. B. finanzieller Gesamtverlust eines Bereichs, Verhältnis zweier Risikofelder) oder ein gewichteter Mittelwert mehrerer Ausgabeknoten sein. Welche Ausgabe betrachtet wird, hängt von der an das Modell gestellten Frage ab [Sal02, S. 582]. Jedoch ist die Methodik für eine globale Sensitivitätsanalyse unabhängig davon, welcher Art die betrachtete Ausgabe ist. Die Funktion f in der Gleichung $Y = f(X)$ ist keine feste Funktion, sondern steht für sämtliche durch das Modell getroffenen Entscheidungen und Verzweigungen, die auch stochastischer Natur sein können.

Ziel der Sensitivitätsanalyse soll die Bestimmung des Einflusses jeder Eingangsvariable X_i auf die Varianz der betrachteten Ergebnisvariable Y sein [SRTC05, S. 32]. Eine andere

Formulierung bezeichnet die Sensitivität (ersten Grades) als die erwartete Verringerung der Varianz des Ergebnisses $V(Y)$ durch den Fall, dass der „echte Wert“ x_i^* von X_i bekannt ist. Dazu wird die bedingte Varianz des Ergebnisses $V(Y|X_i = x_i^*)$, die sich ergibt, wenn X_i auf ihren „echten Wert“ x_i^* fixiert wird, ins Verhältnis zur unbedingten Varianz $V(Y)$ gesetzt.

Das Problem ist jedoch, dass x_i^* nicht für alle X_i bekannt ist. Als Annäherung bietet es sich an, die Modellfunktion $f(X)$ durch $E(Y|X_i)$ anzunähern. $V_i = V[E(Y|X_i)]$ ist die erwartete Reduktion der Varianz für den Fall, dass es möglich wäre, den echten Wert x_i^* von X_i zu kennen.

Die *Sensitivität ersten Grades* der Modellausgabe Y bezogen auf die i -te Eingabevariable X_i ist dann

$$S_i = \frac{V_i}{V(Y)} = \frac{V[E(Y|X_i)]}{V(Y)}, \quad (5.1)$$

mit $E(\cdot)$ als bedingtem Erwartungswert und $V(\cdot)$ als Varianz. S_i ist ein Einflussmaß für den Inputfaktor X_i mit dem Wertebereich $[0, 1]$. S_i ist unabhängig von der Struktur des Modells, insbesondere ist keine Additivität und keine Unabhängigkeit der Eingabefaktoren notwendig [Sal02, S. 583]. Wenn nun S_i für alle Eingabevariablen bestimmt werden kann, dann können die Variablen nach dem Grad ihres Einflusses geordnet werden. Die „wichtigste“ Variable ist dabei diejenige mit der größten Sensitivität S_i .

Die Einflüsse, die eine Eingabevariable erst im Zusammenwirken mit anderen, abhängigen Variablen ausübt, sind in der Sensitivität ersten Grades nicht erfasst. Weil die Eingabevariablen im Modell interagieren, sollten jedoch auch die Interaktionseffekte quantifiziert werden, die auftreten, wenn sich bei der Änderung zweier Faktoren die gemeinsame Auswirkung von der Summe ihrer individuellen Auswirkungen unterscheidet.

Für d unabhängige Eingabevariablen kann die unbedingte Varianz $V(Y)$ nach zunehmender Dimensionalität aufgeteilt werden (Varianz-Dekomposition) [Sal02, S. 585]:

$$V(Y) = \sum_i V_i + \sum_{i<j} V_{ij} + \sum_{i<j<k} V_{ijk} + \dots + V_{12\dots d}, \quad (5.2)$$

mit

$$\begin{aligned} V_i &= V[E(Y|X_i)], \\ V_{ij} &= V[E(Y|X_i, X_j)] - V_i - V_j, \\ V_{ijk} &= V[E(Y|X_i, X_j, X_k)] - V_i - V_j - V_k \\ &\dots \\ V_{12\dots d} &= V[E(Y|X_i, \dots, X_d)] - V_i - \dots - V_d \end{aligned}$$

Der Term V_{ijk} bezeichnet zum Beispiel den Anteil an der Ausgabevarianz, der nur auf die Interaktion der unabhängigen Eingabevariablen X_i, X_j und X_k im Modell zurückzuführen ist. V_{ijk} kann auch negative Werte annehmen, wenn sich die Werte gegenseitig ausgleichen.

Nach der Normierung mit der unbedingten Varianz $V(Y)$ heißen $S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V(Y)}$ Sensitivität zweiten Grades (zweiseitige Interaktionen), $S_{ijk} = \frac{V_{ijk}}{V(Y)}$ Sensitivität dritten Grades (dreiseitige Interaktionen) und so weiter.

Mit diesen Definitionen lässt sich für den Fall *unabhängiger* (und damit immer auch unkorrelierter) Eingabevariablen die *totale Sensitivität* T_i für eine Eingabevariable X_i als Summe aller Sensitivitäten S bestimmen, deren Index die Variable i enthält. Sie misst die Unsicherheit im Ergebnis Y , wenn ausschließlich X_i veränderlich ist und der „wahre Wert“ aller anderen Eingabevariablen bekannt ist.

Die formale Definition der totalen Sensitivität lautet [SWN03, S. 195]

$$T_i = S_i + \sum_{j>i} S_{ij} + \sum_{j<i} S_{ji} + \dots + S_{1,2,\dots,d}. \quad (5.3)$$

Für den Fall dreier Eingabevariablen X_1 , X_2 und X_3 sind die totalen Sensitivitäten

$$\begin{aligned} T_1 &= S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123} \\ T_2 &= S_2 + S_{12} + S_{23} + S_{123} \\ T_3 &= S_3 + S_{13} + S_{23} + S_{123} \end{aligned}$$

Die Differenz zwischen T_i und S_i misst den Einfluss von X_i , der auf verschiedene Wechselwirkungen im Modell zurückzuführen ist.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Messung der Sensitivität auch dann möglich ist, wenn sich in jedem Simulationslauf alle Eingabewerte verändern. Im Falle *abhängiger* Eingabevariablen (z. B. bei der Erzeugung korrelierter Zufallszahlen zur Bestimmung der Eingabe-Verlusthöhen wie in Abschnitt 4.3.2.3 auf S. 48 gezeigt) funktioniert die obige Dekomposition jedoch *nicht*. Als Alternative bietet sich in diesem Fall nur der „brute force“-Ansatz an, den Wert einer Eingabevariable zu fixieren, die Varianz des Ausgabewertes über eine ausreichende Zahl von Simulationsläufen zu messen und ins Verhältnis zur unbedingten Varianz (bei Veränderlichkeit aller Eingabevariablen) zu setzen.

Santner et al. [SWN03, S. 190] nennen die Analyse der *linearen Korrelation* für alle Eingabevariablen als einfachste Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen jeder Eingabevariable und der Ausgabe des Modells zu analysieren. Als Nachteil wird dort angegeben, dass nur lineare Zusammenhänge erkannt werden können. Die Software „Crystal Ball 2000“ beinhaltet eine Funktion mit dem Namen „Sensitivitätsanalyse“. Dort wird die Rangkorrelation herangezogen, um den Einfluss jeder Eingabevariablen auf die Ausgabevariablen zu messen. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist damit auch stark von der Form des zugrunde liegenden Modells abhängig. Dabei werden jedoch nur die direkten Einflüsse berücksichtigt, so dass die Ergebnisse für Modelle mit korrelierten Zufallszahlen oder nichtmonotonen Zusammenhängen (die z. B. bei der Verknüpfung von Ereignissen über bedingte Wahrscheinlichkeitstabellen auftreten können) ggf. falsch sein können [Dec04, S. 212].

5.6.3 Bayes-Netzwerk als Entscheidungsgraph

Der Nutzen des Risikomanagements bleibt begrenzt, wenn sein einziger Zweck ist, eine möglichst genaue Schätzung für das Gesamtrisiko des Unternehmens zu liefern. Viel wichtiger ist es, Maßnahmen zu identifizieren, die das Risiko mit dem kleinstmöglichen Aufwand auf ein akzeptables Maß reduzieren. Bei der Identifikation der zu behandelnden Risiken können die in Abschnitt 5.6 vorgestellten Techniken hilfreich sein. Für die Bewertung von Handlungsalternativen gibt es im Gebiet der Bayes-Netzwerke bessere Techniken,

die das Risikomanagementsystem zu einem echten Entscheidungsunterstützungssystem machen können.

Dazu wird das Bayes-Netzwerk um *Entscheidungsknoten* (engl.: decision nodes) und *Nutzenknoten* (engl.: utility nodes) erweitert.

Nutzenknoten bewerten die Zustände der Welt (des Bayes-Netzwerkes) auf einer numerischen Nutzenskala. Für unsere Zwecke empfiehlt es sich, die Erwartungswerte für die Verluste durch *Risikowirkungen* als Nutzenbewertungen heranzuziehen. Bei der Bewertung mehrerer Handlungsalternativen ist diejenige vorzuziehen, die den geringeren erwarteten Verlust bringt.

Entscheidungsknoten repräsentieren mehrere Handlungsalternativen (in diesem Fall zur Risikominderung), die Auswirkungen auf die Wahrscheinlichkeit eines oder mehrerer Ereignisse haben. Sie verändern, genau wie die Eingabe von bekannten Tatsachen (Evidence) in Abschnitt 5.6.1, die Wahrscheinlichkeitsverteilung, je nachdem, welcher Wert über sie eingegeben wird.

Der Unterschied zwischen einer Entscheidung und einer bekannten Tatsache ist, dass die Entscheidung nur Wahrscheinlichkeiten *in Pfeilrichtung* beeinflussen kann. Wir erinnern uns, dass die Pfeile in einem Bayes-Netzwerk *kausale* Beziehungen repräsentieren. Es würde dem Konzept der Kausalität zuwiderlaufen, wenn die Veränderung einer Auswirkung (eines Symptoms) durch eine Handlung die Wahrscheinlichkeit der Ursache verändern könnte. Anders beim „Belief Updating“ (Abschnitt 5.6.1): Wenn der Zustand des Symptoms beobachtet wird, ändern sich auch die Annahmen über die Ursache.

Zur Demonstration dieser Erweiterungen soll das Bayes-Netzwerk mit Blitz, Feuer und Wasserschaden um die Entscheidung erweitert werden, ob eine Sprinkleranlage installiert werden soll. Diese senkt direkt das Risiko für einen Feuerschaden und erhöht direkt das Risiko für einen Wasserschaden. Die rautenförmigen Knoten enthalten die Verlusterwartungen aus den Risikowirkungen, um die das Netzwerk in Abschnitt 5.5.6.6 erweitert wurde. Diese sind für den Blitzschaden 666 666 €, für den Feuerschaden 866 666 € und für den Wasserschaden 1 533 333 €⁹.

Der Entscheidungsknoten „Sprinkler“ hat die zwei Zustände „Anlage“ und „keine Anlage“. Um die Beeinflussung durch die Sprinkleranlage anzugeben, müssen die bedingten Wahrscheinlichkeitstabellen der Ereignisse „Feuer“ und „Wasserschaden“ noch einmal in Abhängigkeit vom Kauf der Sprinkleranlage angegeben werden. Die Zahl der zu schätzenden Wahrscheinlichkeiten für „Feuer“ und „Wasserschaden“ hat sich damit verdoppelt. In Tabelle 5.4 sind noch einmal die bedingten Wahrscheinlichkeiten *vor* Einführung des Entscheidungsknotens angegeben. Tabellen 5.5 und 5.6 zeigen die Wahrscheinlichkeiten unter Berücksichtigung der Option einer Sprinkleranlage.

<i>Feuer</i>	<i>Blitz</i>	<i>¬Blitz</i>	<i>Wasserschaden</i>	<i>Brand</i>	<i>¬Brand</i>
Brand	3 %	1 %	Wasserschaden	40 %	1 %
¬Brand	97 %	99 %	¬W.schaden	60 %	99 %

Tab. 5.4: Bedingt Wahrscheinlichkeiten ohne Sprinkleranlage

Die Annahmen sind, dass die Feuerwahrscheinlichkeit durch eine Sprinkleranlage noch einmal um 66 % sinke, d. h. die Wahrscheinlichkeit für ein Feuer im Falle eines Blitzschlags

⁹Der Erwartungswert einer dreiecksverteilten Zufallsvariable X mit den Parametern a (niedrigster Wert), b (höchster Wert) und c (wahrscheinlichster Wert) berechnet sich zu $E(X) = \frac{a+b+c}{3}$.

<i>Sprinkler</i> <i>Feuer</i>	<i>Anlage</i>		<i>–Anlage</i>	
	<i>Blitz</i>	<i>–Blitz</i>	<i>Blitz</i>	<i>–Blitz</i>
Brand	1 %	0,333 %	3 %	1 %
–Brand	99 %	99,667 %	97 %	99 %

Tab. 5.5: Reduktion der Feuerwahrscheinlichkeit um 66 % durch eine Sprinkleranlage

<i>Sprinkler</i> <i>Wasserschaden</i>	<i>Anlage</i>		<i>–Anlage</i>	
	<i>Feuer</i>	<i>–Feuer</i>	<i>Feuer</i>	<i>–Feuer</i>
Wasserschaden	99,9 %	1,1 %	40 %	1 %
–Wasserschaden	0,1 %	98,9 %	60 %	99 %

Tab. 5.6: Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Wasserschadens durch eine Sprinkleranlage

sinke von 3 % auf 1 % und die Wahrscheinlichkeit für Feuer sonst sinke von 1 % auf $0,3\bar{3}$ %. Die Sprinkleranlage führe aber auch dazu, dass der Eintritt eines Wasserschadens im Falle eines Feuers fast sicher sei (99,9 % statt 40 %). Die Möglichkeit, dass die Sprinkleranlage aufgrund einer Fehlfunktion auch ohne Feuer auslösen könnte ist in der Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Wasserschadens ohne Feuer von 1 % auf 1,1 % berücksichtigt.

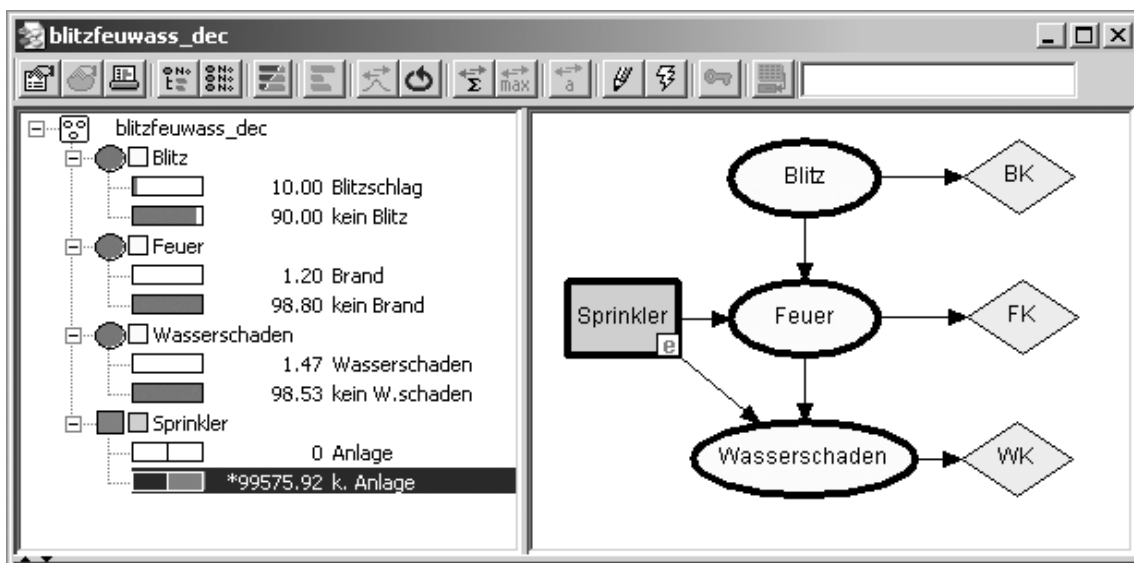


Abb. 5.11: Wahrscheinlichkeiten und Kosten ohne Installation einer Sprinkleranlage

Das Ergebnis der Berechnung lässt sich auf der linken Seite von Abbildung 5.11 ablesen: Die erwarteten Kosten *nach* der Installation einer Sprinkleranlage sind 93 059,59 € gegenüber 99 575,92 € *vor* der Installation. Sollte die jährliche Abschreibung auf den Wert der Sprinkleranlage während ihrer Lebensdauer 6 516,33 € nicht überschreiten, so lohnt sich der Kauf nach diesem Modell. Das Ergebnis mag zunächst verwundern, weil die Wahrscheinlichkeit für einen Wasserschaden, der ja fast doppelt so teuer wäre wie ein typischer Feuerschaden, durch die Sprinkleranlage laut Tabelle 5.5 stark steigen müsste. Die Senkung der Feuerwahrscheinlichkeit senkt aber indirekt auch die Wahrscheinlichkeit für Wasserschäden, weil diese häufig erst durch das Feuer *bedingt* sind. Die Netto-Auswirkung einer Sprinkleranlage auf die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse „Feuer“ und „Wasserschaden“ ist in den Abbildungen 5.11 und 5.12 gezeigt. Insgesamt fällt die Wahrscheinlichkeit für Feuer von 1,2 % auf 0,4 %, während die Wahrscheinlichkeit für einen Wasserschaden

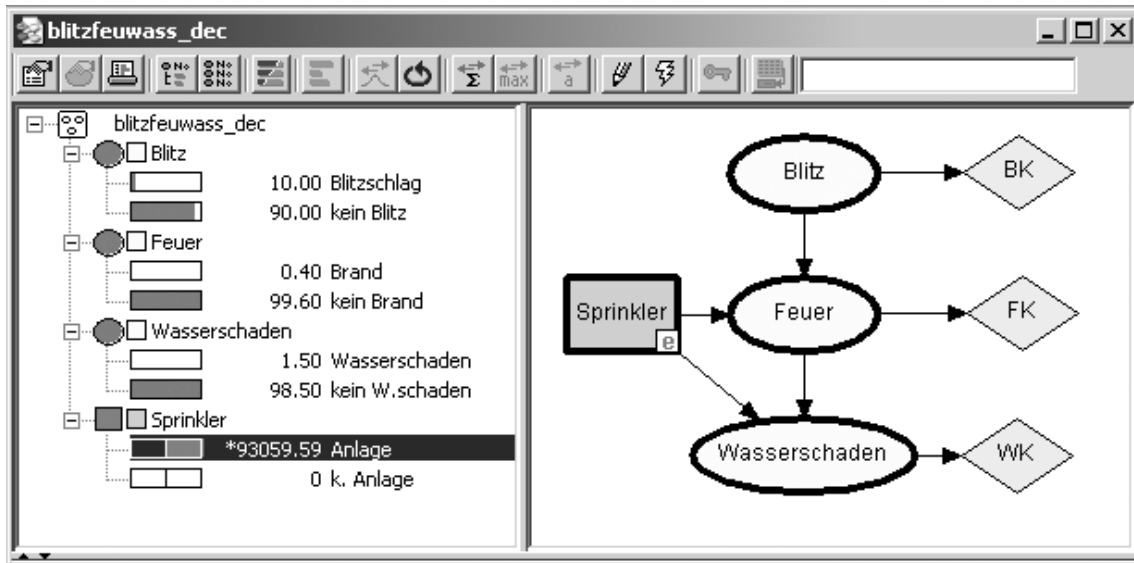


Abb. 5.12: Wahrscheinlichkeiten und Kosten nach der Entscheidung für eine Sprinkleranlage

durch die Installation einer Sprinkleranlage netto nur von 1,47 % auf 1,5 % steigt. Die Wahrscheinlichkeit für Blitze wird durch die Sprinkleranlage nicht tangiert.

Für die Theorie hinter den Berechnungen sei auf Jensen [Jen01, S. 109–137] verwiesen.

5.7 Validierung/Backtesting des Modells

Eine generelle Umschreibung des Begriffs „Modellvalidität“ findet sich bei [LK00, S. 279]. Demnach müssen die Ausgabedaten des Modells möglichst stark den Ausgabedaten des tatsächlichen Systems ähneln, damit das Modell als valide bezeichnet werden kann.

Diese Definition eignet sich gut, um das Hauptproblem bei der Validierung von Modellen im Bereich von Betriebsrisiken aufzuzeigen: Die „Ausgabedaten des tatsächlichen Systems“ liegen weder in ausreichender Zahl vor, noch liegen die tatsächlichen Daten zu dem Zeitpunkt vor, an dem das Modell benutzt wird. Außerdem ist das „tatsächliche System“ ein ganzer Konzern und damit auch ex post nur schwer beobachtbar. Und nicht zuletzt kann zu jedem Beobachtungszeitpunkt nur ein einziger Datenpunkt für das tatsächliche Geschäftsergebnis jedes Bereichs abgelesen werden, während die Prognose des Risikos durch einen Value at Risk die Abschätzung eines ganzen Bereichs möglicher Geschäftsergebnisse repräsentiert.

Zur Erinnerung sei hier die verbale Umschreibung des Value at Risk noch einmal wiederholt: *Der Value at Risk ist der höchste mögliche Verlust, der in einer gegebenen Zeitspanne mit der Wahrscheinlichkeit α nicht überschritten wird.* Nach wissenschaftlichen Kriterien beweist auch ein eingetretenes Gesamtrisiko, das unterhalb des vorher prognostizierten Value at Risk lag, nicht die Richtigkeit des Modells. Auch ein einmaliges Überschreiten der Verlustgrenze kann das Modell nicht falsifizieren, da dies je nach Wahl des Konfidenzniveaus in einem Teil der Fälle zulässig ist (bei einem VaR_{95} zum Beispiel durchschnittlich alle 20 Jahre). Erst eine statistisch signifikante Häufung von Überschreitungen des prognostizierten Risikos lässt eine Aussage darüber zu, dass das Modell mit einer hohen Wahrscheinlichkeit falsch war. Diese Möglichkeit ist aber nicht von praktischer Relevanz, weil das gemessene System eine solche Messung nicht überlebt.

Bestimmte Modellfehler sind auch ohne statistische Tests und fortgeschrittene Berechnungen sofort erkennbar. Ein eingetretener Verlust, der über dem maximal möglichen Gesamtverlust lag, falsifiziert das Modell sofort (für die Bestimmung dieser oberen Grenze muss jedoch keine Simulation durchgeführt und kein Value at Risk bestimmt werden). Ebenfalls deutet ein möglicher Gesamtverlust, der deutlich über dem Unternehmenswert liegt, auf eine im Modell fehlende Begrenzung der Verlusthöhen (zum Beispiel durch die Liquidation von Unternehmensteilen) und die fehlende Berücksichtigung von Chancen hin.

Entsprechend der Verwendung von Experteneinschätzungen für die ursprüngliche Risikobewertung bietet sich auch hier eine Plausibilitätsprüfung der Annahmen und der Modellprognosen an. Jedoch erfordert die Beschäftigung mit Verlusthöhen, die beispielsweise nur einmal in 20 Jahren überschritten werden, eine gewisse Distanz der beteiligten Experten zu ihrem Geschäft und die Bereitschaft, auch das „Undenkbare“ einmal zu denken.

5.7.1 Maßnahmen zur Steigerung der Modellvalidität

Zur Steigerung der Modellvalidität werden von Law und Kelton [LK00, S. 274–282] folgende Möglichkeiten vorgeschlagen:

1. Sammeln von Daten durch
 - Durchführen von Expertenbefragungen
 - Beobachten bestehender Systeme
 - Auswerten bestehender Theorien
 - Auswerten ähnlicher Simulationen
 - Hypothesenbildung aufgrund eigener Erfahrungen
2. Regelmäßige Interaktion mit dem Management
3. Nachhalten der Annahmen in einem separaten Dokument und schrittweise Modellanalyse
4. Quantitative Validierung von Teilbereichen des Modells
5. Validierung des Gesamtergebnisses
6. Visualisierung des Modells

In der europäischen Kommission werden für die Abschätzung der Auswirkungen von Regulierungsvorhaben so genannte „Impact Assessments“ durchgeführt [Eur05]. Die dabei verwendete Methodik ähnelt in vielen Punkten den Methoden des Risikomanagements. Dabei bestehen ebenfalls die Probleme, dass sich nicht alle Auswirkungen in monetärer Hinsicht quantifizieren lassen und dass nicht immer ausreichende Daten für quantitative Berechnungen zur Verfügung stehen. Im technischen Anhang der Methodenbeschreibung für „Impact Assessments“ werden u. a. folgende Ansätze zum Generieren von Schätzungen bei schlechter Datenlage genannt:

- Benutzen von Verhältniszahlen, die sich in verschiedenen Bereichen nicht stark unterscheiden, für die Schätzung absoluter Zahlen

- Suche nach allgemein akzeptierten Daumenregeln
- Übertragen von Verhältniszahlen ähnlicher Probleme
- Benutzen einer bekannten Variable, um eine unbekannte zu schätzen, wenn das Verhältnis der Variablen bekannt ist
- Setzen von plausiblen Grenzen unter Berücksichtigung bekannter Variablen (EU-Beispiel: die maximale Zahl von Kindern, die Windeln benutzen, kann nicht größer sein als die Bevölkerungszahl im Alter zwischen 0 und 4 Jahren)
- Benutzen von Triangulation, d. h. Anwendung mehrerer empirischer Modelle bzw. Datenquellen nebeneinander und Vergleich der Ergebnisse

Weiterhin wird die Delphi-Methode erwähnt, ein strukturiertes Verfahren zum Zusammenlegen mehrerer Expertenschätzungen.

6. Weiterentwicklung des Risikomanagements der SAP

In den vergangenen Kapiteln wurden Methoden für die Quantifizierung, Aggregation und Analyse von Risiken vorgestellt. Wenn möglich wurde ein Bezug zu den bei der SAP bereits eingesetzten Methoden hergestellt. In einem abschließenden Schritt soll nach einer Analyse der Position des Risikomanagements im Vergleich zu anderen Unternehmen ein evolutiv-närer Weg aufgezeigt werden, um die unternehmensweit bestehenden Methoden und Tools in Richtung eines quantitativen, automatisierten Risikomanagements weiterzuentwickeln.

6.1 Vergleich mit Praxis und Tools anderer Konzerne in Deutschland

Im Folgenden soll beispielartig die Risikomanagement-Praxis unterschiedlicher Konzerne in Deutschland beleuchtet werden. Die Informationen wurden in persönlichen Gesprächen mit den jeweiligen Risikomanagementstellen vor Ort gewonnen.

6.1.1 Schering

Bei der Schering AG ist eine konzernweite Risikomanagementmethode derzeit noch im Aufbau. Dazu wurde eine Stabsstelle beim Konzern eingerichtet. In einzelnen Bereichen wird jedoch schon seit längerer Zeit ein strukturiertes Risikomanagement betrieben. Die große Herausforderung für ein unternehmensweites Risikomanagement ist es, die nach unterschiedlicher Methodik gesammelten Informationen für eine konzernweite Berichterstattung vergleichbar zu machen oder die Methodik in den Teilbereichen zu vereinheitlichen.

Im Folgenden sollen die wichtigsten Aspekte der Risikomanagementmethode im Bereich „Integrated EHS Management“, also der Risiken im Zusammenhang mit der Produktion und Lagerung von Medikamenten, erwähnt werden.

Die Funktion „Risk Management Supply Chain“ setzt auf eine halbquantitative Methode, bei der Risiken aus den Standorten nach Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadenspotenzial in Euro in je vier Klassen eingeteilt werden. Risiken, die in die höchste oder zweithöchste

Wahrscheinlichkeits- oder Auswirkungsklasse fallen, werden hervorgehoben auf Konzernebene im Rahmen des Corporate Risk Management berichtet und verdichtet. Weiterhin gibt es ein Kennzeichen für Risiken mit Personengefährdung. Risiken mit diesem Kennzeichen werden grundsätzlich immer in die Berichterstattung aufgenommen.

Als Softwareunterstützung wurde eine Lotus Notes-basierte Datenbank mit Transfer zu Microsoft Access zur Auswertung entwickelt, in der die Risiken durch die Risikomanager erfasst werden. Durch die Zuordnung von Kennzeichen können die Risiken nach weiteren Kriterien wie betroffenen Produkten gefiltert werden.

Eine quantitative Beschreibung wird nicht für alle Risiken als sinnvoll erachtet. Informationen über quantitative Auswirkungen werden ggf. bei der Risikobeschreibung gegeben. Eine quantitative Aggregation der Risiken wird auf Konzernebene geprüft.

6.1.2 Deutsche Telekom

Die Deutsche Telekom AG verfügt auf Konzernebene über einen Bereich „Corporate Risk Management, Insurance (CRI)“, der u. a. die zentrale Methoden- und Systemkompetenz für ein konzernweites Risikomanagement-System hat. Auf der Grundlage dieses Systems werden Risikoinformationen der strategischen Geschäftseinheiten zusammengeführt und zusammen mit konzernübergreifenden Themen für die interne und externe Berichterstattung aufbereitet.

Die organisatorische Ausgestaltung des Risikomanagements der Geschäftseinheiten liegt grundsätzlich in der Verantwortung der Geschäftsleitung der entsprechenden Gesellschaft. Die vierteljährliche Berichterstattung der wichtigsten quantitativen und qualitativen Risiken erfolgt jedoch nach klaren Vorgaben der Konzernzentrale. Der Ansatz der Deutschen Telekom AG bezieht auch das Reporting von Chancen mit ein, so dass von einem integrierten Chancen- und Risikomanagement gesprochen wird.

Für die Aggregation von quantitativ bewerteten Risiken und Chancen wurde von CRI ein eigenes IV-Tool konzipiert und durch die T-Systems programmiert. Mit dieser Anwendung können die Risiken in ihren Auswirkungen durch stochastische Verteilungen ergänzt werden. Die Schätzungen dafür werden von CRI vorgenommen und in die Anwendung eingepflegt. Mittels Monte Carlo Simulation werden so die wesentlichen Risiken und Chancen quantitativ in ihrer Auswirkung auf den EBITDA¹ zu einer Gesamtverteilung möglicher Gewinne und Verluste aggregiert. Aus dieser Verteilung wird als Risikomaß der Value at Risk als 15-%-Quantil der Gewinn- und Verlustverteilung bestimmt. Abhängigkeiten werden über die Angabe von Korrelationskoeffizienten bei der Aggregation berücksichtigt. In der Praxis werden nur Korrelationen von 0, 1 bzw. -1 genutzt.

6.1.3 Vattenfall Europe

Bei der Vattenfall Europe AG existiert ein Stab „zentrales Risikomanagement und -controlling“, der direkt beim CFO angesiedelt ist. Diese berichtet quartalsweise die Gesamtrisikoposition des Konzerns an den Vorstand. Die operativen Bereiche sind dafür verantwortlich, ihre Risiken an das zentrale Risikomanagement gemäß einer einheitlich vorgegebenen Methodik zu berichten und zu quantifizieren. Die Beschreibung muss dabei eine auf ein Jahr bezogene Verlustverteilung beinhalten. Die Ermittlung erfolgt in der

¹Earnings Before Interest, Tax, Depreciation and Amortization; Gewinn vor Zinsen, Steuern und Abschreibungen

Regel durch Expertenschätzungen anhand nachvollziehbarer Szenarien. Die abgefragten Quantile werden mittels des frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriffs kommuniziert: für das 50-%-Quantil wird beispielsweise nach der Verlusthöhe durch das Risiko gefragt, die üblicherweise nur alle 2 Jahre überschritten wird.

Auf diese Weise wird eine dreistellige Zahl an Einzelrisiken erhoben und bewertet. Mit Hilfe der Zusatzsoftware „Crystal Ball“ für Microsoft Excel wird für jedes Risiko eine stetige Verteilung beschrieben. Anschließend werden die Risiken mit Hilfe einer Monte Carlo Simulation ebenfalls durch Crystal Ball zu einer Gesamtverlustverteilung aggregiert, aus der ein Value at Risk als 95-%-Quantil bestimmt wird.

6.1.4 Allgemeine „Best Practice“

In einer Untersuchung zum Stand des Risikomanagements in deutschen Unternehmen hat KPMG von August bis September 2002 die Antworten von 102 Aktiengesellschaften und 86 sonstigen Kapitalgesellschaften aller Branchen mit Ausnahme von Versicherungen ausgewertet [KPM03].

Die Untersuchung wurde in die sechs Felder Risikostrategie, Corporate-Organisation, Risikomanagement-Organisation, Risikoerkennung und Risikosteuerung, Risikoüberwachung und Risikomanagement-Informationssystem gegliedert. Der Fragebogen umfasste in jedem Bereich fünf bis neun Fragen mit je drei möglichen Antworten. Jede Antwort soll einen Entwicklungsstand des Risikomanagements von reaktivem Risikomanagement (Ordinalwert 1) über taktisches Risikomanagement (Ordinalwert 3) bis zu strategischem Risikomanagement (Ordinalwert 5) widerspiegeln.

Der angewendeten Methode, aus den Ordinalwerten einen arithmetischen Mittelwert zu bilden und diesen Wert als Entwicklungsstand in einem Risikomanagement-Feld anzusehen soll hier nicht gefolgt werden. Einige Fragen, die besonders im Hinblick auf die Risikoaggregation bzw. Toolunterstützung relevant sind, sind in Tabelle 6.1 auf S. 87 wiedergegeben.

Dabei zeigt sich, dass die verwendeten Tools noch großen Verbesserungsbedarf haben. Stochastische Verfahren und Simulationstechniken können noch nicht als Standard angesehen werden.

6.2 Risikomanagement-Framework der SAP und Anwendung ORM

Nachdem die Situation des Risikomanagements bei anderen deutschen Unternehmen dargestellt wurde, sollen einige Besonderheiten der Situation bei der SAP näher beleuchtet werden, sofern das noch nicht in den vorangegangenen Kapiteln geschehen ist.

6.2.1 Situation bei der SAP

Derzeit sind in der SAP ca. 45 FTE (Full Time Equivalents) mit dem Thema Risikomanagement beschäftigt. Risikomanagement wird in der Verantwortung der jeweiligen Geschäftseinheiten bzw. Projekte betrieben, d. h. es wird grundsätzlich ein Bottom-Up-Ansatz verfolgt. Gleichzeitig unterliegt das Unternehmen rechtlichen Auflagen und betriebswirtschaftlichen Anforderungen, die einen Überblick über die wichtigsten Risiken auch aus einer Top-Down-Perspektive (z. B. in Form von regelmäßigen Board Reports) erfordern.

a) Wie flexibel ist Ihr Risikomanagement-System?	
Keine Antwort	5,2 %
Risiken werden anhand eines Bewertungsmaßstabs für das Gesamtunternehmen beurteilt	36,6 %
Bewertungen werden durch ein zentrales RM auf Gesamtunternehmensebene konsolidiert	39,8 %
Konsolidierungsstufen für die Bewertung sind im Risikoerkennungsprozess institutionalisiert	18,4 %
b) Inwieweit werden Sensitivitätsanalysen bzw. Szenariosimulationen durchgeführt?	
Keine Antwort	3,8 %
Es sind keine Sensitivitätsanalysen bzw. Szenariosimulationen vorgesehen	45,8 %
Es werden fallweise Sensitivitätsanalysen durch den Vorstand/die Geschäftsführung in Auftrag gegeben	42,1 %
Laufende Überprüfung von Kumulationen/Interdependenzen und Szenariosimulationen .	8,3 %
c) Werden weitere analytische Verfahren zur Risikoermittlung angewendet?	
Keine Antwort	5,8 %
Es werden keine weiteren Verfahren zur Quantifizierung von Risiken eingesetzt	51,5 %
Schadenshochrechnungen erfolgen nach Abschluss der Risikoanalyse („best, most probable und worst case“)	34,6 %
Anwendung und Einsatz von stochastischen Verfahren (VAR, RAROC), Trendanalysen .	8,1 %
d) Bis zu welchem Grad ist Ihr System zu stochastischen Auswertungen fähig?	
Keine Antwort	16,3 %
Stochastische Auswertungen sind im System nicht möglich	60,8 %
Grundfunktionen der stochastischen Auswertung existieren	20,4 %
Stochastische Auswertungsmöglichkeiten können durchgeführt werden, einschließlich Konvertierung und Weiterverwertung der Ergebnisse in anderen Systemen	2,5 %
e) Sicherheit des Systems und Benutzerfreundlichkeit der Administration gewährleistet?	
Keine Antwort	19,9 %
Möglichkeit der freien Manipulation ist gegeben; Administration ist nur im eingeschränkten Maß möglich	24,6 %
Sicherheiten sind begrenzt gegeben; Administration des Systems ist gegeben (mit kleinen Einschränkungen)	41,2 %
Vollkommen freie Festlegung von Usern/Usergroups und deren Berechtigung – optimale IT-Sicherheit (intern/extern)	14,3 %

Tab. 6.1: Ausgewählte Ergebnisse der KPMG-Studie „Risikomanagement in deutschen Unternehmen“ [KPM03]

Es ist die Aufgabe des Global Risk Managements der SAP als Stabsabteilung, ein konzernweit einheitliches Risikomanagement sicherzustellen und eine konzernweite Perspektive auf die Risiken darzustellen. Zu diesem Zweck ist im Corporate Risk Management Modell der SAP eine einheitliche Methodik für die Beschreibung von Risiken vorgegeben. Sämtliche auf Ebene der Projekte und Geschäftseinheiten erhobenen Einzelrisiken (derzeit mehrere Tausend) werden in der Anwendung ORM (Operational Risk Management) abgelegt. Ein Problem bei der Erfüllung der Aufgaben des Global Risk Managements liegt darin, dass diese Daten nicht nur im Hinblick auf eine zentrale Auswertung erhoben werden, sondern zum Großteil zur Unterstützung der Planung und Steuerung in den Projekten und Geschäftseinheiten dienen. Vor allem strategische Risiken ergeben sich unter anderem erst aus der Kombination vieler kleinerer Einzelrisiken, die über das gesamte Unternehmen verteilt sind und die einzeln betrachtet nicht notwendigerweise bedeutend erscheinen.

Die Beschreibung der Risiken erfolgt nach einer halbquantitativen Methode, die in ihren wichtigsten Punkten bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben wurde.

6.2.2 Sicherheitsaspekte in der Risikomodellierung

Die Anwendung ORM bietet mit ihrer Benutzerverwaltung Möglichkeiten für die verteilte Verwaltung des Risikoinventars, mit Arbeitsabläufen für die Validierung (Prüfung) eingetragener Risiken durch den verantwortlichen Manager oder die Aktualisierung der Statusinformationen von Risiken. Die große Zahl von möglichen Nutzern führt zu einer tieferen Verankerung des Risikomanagements in der Organisation.

Gleichzeitig ist es auch notwendig, die Anwendung durch umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen und beschränkte, rollenbasierte Zugriffsrechte, die einen unberechtigten Zugriff auf das Risikoinventar verhindern sollen, zu schützen. Die dort verwalteten Informationen sind teilweise als sicherheitsrelevant eingestuft. Unter anderem erfolgt die Bearbeitung von Risiken durch gelegentliche Nutzer auf einem separaten System, in das nur die zu bearbeitenden Risiken nach Bedarf repliziert werden. Eine Folge dieser Maßnahmen ist es, dass fast kein Nutzer einen bereichsübergreifenden Zugriff auf alle Risiken besitzt.

Diese Architektur steht teilweise im Widerspruch zu den Anforderungen eines integrierten, bereichsübergreifenden Risikomanagements das versucht, die vielfältigen Vernetzungen innerhalb der SAP AG abzubilden. Für eine derart vernetzte Beschreibung müssen Risiken auch über Bereichsgrenzen hinweg aufeinander Bezug nehmen können (vgl. Abschnitt 4.1.1.1). Es besteht zwar die Möglichkeit, zwischen zwei Bereichen abzustimmen, dass ein Risiko über die Bereichsgrenze verknüpft werden darf; soll jedoch eine umfangreichere Risikoverkettung abgebildet werden, die ihren Ursprung zum Beispiel als „Marktrisiko“ im Solution Support hat, sich in der Entwicklung auf unterschiedliche Prozesse auswirkt und über den Vertrieb schließlich die Umsatzziele des Unternehmens bedroht, so müsste jedem Beteiligten erlaubt werden, die Risiken der anderen Bereiche einzusehen, die mit dem eigenen Risiko zusammenhängen. Gerade wenn die Risikoquantifizierung eines vorgelagerten Bereichs Auswirkungen auf die eigene Risikoschätzung hat, sollte eine solche Kontrollmöglichkeit gegeben sein. Je besser dabei die tatsächlichen Zusammenhänge und Verkettungen abgebildet werden sollen, desto größer müsste der Teil des Gesamtbildes sein, den jeder Einzelne zu sehen bekommt. Dem steht aber auch die große Zahl an verwalteten Risiken entgegen, weil damit eine effektive Kontrolle darüber, welche Risiken vertraulich zu behandeln sind, zunehmend schwierig wird.

Unter Beibehaltung des derzeitigen Sicherheitsmodells sind zusätzliche Vorkehrungen zu treffen, um die Modellierung von Abhängigkeiten zwischen Risiken zu ermöglichen.

Denkbar ist zum Beispiel, dass bei einer kausalen Modellierung (mit gerichteten Kanten zwischen den Risiken) eine Sichtbarkeit fremder Risiken nur *entgegen der Pfeilrichtung* gegeben ist. Damit könnte ein Bereich die Risiken sehen, von denen er abhängig ist. Die fremden Risiken, die von den eigenen Risiken abhängig sind, liegen „pfeilabwärts“ und würden dem Bereich verborgen bleiben. In dem Beispiel könnte der Entwicklungsbereich also das Marktrisiko sehen, von dem er abhängt, die verbundenen Vertriebs- und Finanzrisiken blieben ihm jedoch verborgen. Damit wird jedoch auch die Chance vertan, Risiken möglichst weit an der Quelle zu erkennen, die sich erst in anderen Bereichen gravierend auswirken.

6.2.3 Weiterentwicklung des Datenmodells

Für die Umsetzung einer geschäftszielorientierten Aggregation muss zunächst ein Datenmodell festgelegt werden, das die strukturellen Zusammenhänge zwischen Einzelrisiken („Inventarrisiken“, „Verknüpften Risiken“), Aggregatrisiken (als Zusammenfassung mehrerer Einzelinformationen) und Geschäftszielen („Business Goals“) definiert. Das ist zunächst unabhängig davon, ob die Aggregation später durch Addieren von Erwartungswerten, durch eine korrelationsbasierte Simulation oder durch eine Simulation mit kausaler Zusammenhangsmodellierung (wie Bayes-Netzwerke) vorgenommen werden soll.

Die Aufgabe kommt einem Datenbankentwurf nahe, einem umfassend erforschten Thema. Das Kriterium für eine gute Datenstruktur ist, ob sich die in der Realität beobachteten Entitäten gut mit den vorgesehenen Entitäten decken, und ob sich die später auf der Grundlage der Daten zu beantwortenden Fragen mit der modellierten Zusammenhangsstruktur beantworten lassen. In diesem Zusammenhang ist der Grad der Normalisierung und die Kardinalität von Beziehungen besonders relevant. Auch hier ergibt sich wieder die Abhängigkeit von den eigentlichen Zielsetzungen des Risikomanagements (vgl. Abschnitt 2.2 aus Seite 2).

Folgende Teilaspekte wurden im Laufe eines Brainstormings innerhalb des Global Risk Management der SAP als Fragestellungen im Zusammenhang mit der Datenstruktur identifiziert:

- Beziehungen zwischen Zielen und Einzelrisiken
- Berücksichtigen einer Zielhierarchie
- Bilden von separaten „Aggregatrisiken“
- Berücksichtigen von Zielen

Die Themen sollen kurz mit einigen ihrer Vor- und Nachteile vorgestellt werden. Sie weisen einen Bezug zu den bisherigen Themen der Arbeit auf, die zum Beispiel im Rahmen der Beschreibung einer Klassifikationsstruktur für Risiken, der Zielorientierung allgemein oder der Bildung von Modellen für die Aggregation behandelt wurden. Wegen des stärkeren Praxisbezugs und aufgrund der Struktur der bisherigen Diskurses werden diese Themen hier gesammelt betrachtet.

Da es bei Fragen zu Datenstruktur häufig darum geht, welche Kardinalitäten für die Beziehungen gewählt werden sollen, soll eine grundlegende Überlegung vorangestellt werden. Wenn mehrere Risiken zu übergeordneten „Sammelentitäten“ (z. B. Aggregaten oder Zielen) zugeordnet werden sollen, kann es vorkommen, dass eine eindeutige Zuordnung

schwer fällt. Als Beispiel soll das Risiko dienen, dass ein Kunde verloren geht, wenn eine bestimmte, allgemein als weniger wichtig erachtete Funktion nicht in der Entwicklung berücksichtigt wird. Wenn nun zwei Aggregate existieren, wobei das eine Risiken im Zusammenhang mit dem Produkt sammelt, und das andere alle Risiken im Zusammenhang mit dem betroffenen Kunden zusammenfassen soll, besteht ein Konflikt in der Zuordnung. Wird das Risiko beiden Entitäten zugeordnet, muss sichergestellt sein, dass bei einer späteren Aggregation keine doppelte Zählung des Risikos vorgenommen wird. Dazu muss die Aggregationsstruktur entweder einem *Baum* entsprechen, oder das Risiko muss in seiner Höhe aufgeteilt und zu bestimmten Anteilen den beiden Aggregaten zugerechnet werden. Abbildung 6.1 zeigt beispielhaft das Problem. Risiko R_3 ist den zwei Aggregaten AR_A

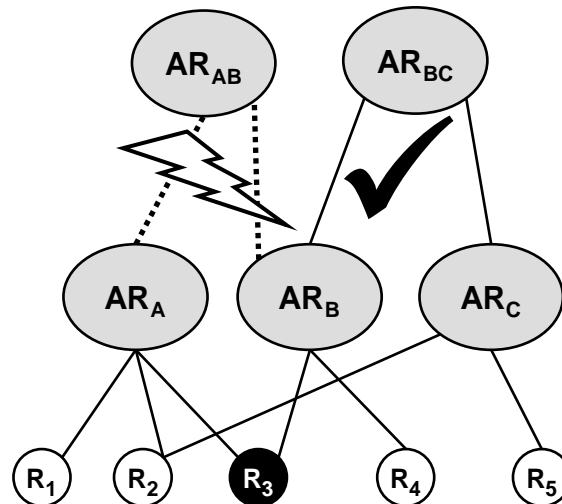


Abb. 6.1: Doppelte Zuordnung von Risiko R_3

und AR_B zugeordnet. Werden AR_A und AR_B später wie in AR_{AB} zusammengefasst, so liegen sie in der gleichen Sicht, und die Baumstruktur wird durch die Mehrfachzuordnung von R_3 verletzt. R_3 würde in AR_{AB} zwei mal gezählt. Entweder wird eine solche Struktur technisch ausgeschlossen, indem die Aggregationsstrukturen klar voneinander in verschiedene Sichten getrennt werden und die Zuordnung nur jeweils einmal pro Sicht zugelassen wird, oder es müssen Vorkehrungen dafür getroffen werden, ein Risiko wie R_3 aufzuteilen. Für beide Verfahren lassen sich fachliche Argumente finden. Wird ein Risiko mehrmals voll gezählt, bedeutet das, dass jeder Aggregationsbaum eine Sicht auf das gleiche Risiko darstellt (im Beispiel wäre das die Kundensicht und die Produktsicht). Wenn Risiken aufgeteilt werden, kann das damit begründet werden, dass die Einzelrisiken bereits eine Zusammenfassung mehrerer Aspekte darstellen. Das korrekte Vorgehen würde jedes Risiko so weit in einzelne Entitäten aufspalten, bis alle Teile eindeutig zugeordnet werden können.

Dagegen spricht, dass die verschiedenen Aspekte eines Risikos auch als einzelne Risikowirkungen modellierbar sein sollten, wenn sie implizit in einem Einzelrisiko enthalten sind. In dem Beispiel sollten dann zwei Risiken gebildet werden: Ein Risiko, das die Auswirkungen nur für das Kundenprojekt schätzt, und ein Risiko, das die weiteren Folgen für das Unternehmen beinhaltet. Dieses Risiko könnte die Probleme des Kundenprojekts als Indikation anführen. Deshalb erscheint es nicht als sinnvoll, eine Aufteilung der Einzelrisiken zuzulassen. Nicht nur in diesem Beispiel wäre es aber von Vorteil, wenn Risikoereignisse und Risikowirkungen als getrennte Entitäten modelliert werden könnten, wie bereits in Abschnitt 5.5.6.4 für eine verbesserte Zusammenhangmodellierung vorgeschlagen. Damit

könnten die Verluste als Risikowirkungen getrennt beschrieben werden, die gemeinsamen Ursachen müssten aber jeweils nur einmal beschrieben werden.

6.2.3.1 Beziehung von Zielen zu Einzelrisiken

Dahinter steht die Idee, auch quantitativ anzugeben, wie stark ein Ziel durch die erfassten Risiken gefährdet ist. Dazu müssen sowohl das Ziel als auch die Risiken, die es gefährden, in einer einheitlichen Maßeinheit beschrieben werden. Auf Seiten des Ziels wird in der Regel ein „Key Performance Indicator“ (KPI) für die Quantifizierung herangezogen, also eine nicht notwendigerweise monetäre Erfolgskennzahl. Einheiten eines KPI können auch Marktanteil, Reaktionszeit, Fehlerhäufigkeit oder Kundenzufriedenheitswerte sein. Das Problem, dass Risiken für die Aggregation spätestens auf der Ebene der Aggregate in einer einheitlichen Maßeinheit gemessen werden müssen, lässt sich in einem vernetzten Modell über Verkettung mehrerer funktionaler Zusammenhänge beschreiben. So könnte die Risikowirkung (z. B. Verlust von Marktanteilen) als direkte Folge eines Risikoereignisses (z. B. Eintritt eines neuen Wettbewerbers) zunächst als „Verlustverteilung“ in der Einheit des Ziel-KPI angegeben werden. Über einen weiteren angenommenen Zusammenhang müsste dann jedem Prozent Marktanteilsverlust ein monetärer Verlust zugeordnet werden, der in der übrigen Aggregation verwendet werden kann.

Das gleiche Problem der Mehrfachzuordnung wie zwischen Einzelrisiken und Aggregaten ergibt sich, wenn die Risiken auf *Ziele* bezogen werden sollen. Die einfachste Lösung wäre es zu fordern, dass Risiken so beschrieben werden müssen, dass sie jeweils nur ein Ziel bedrohen können. Das ist auch der Ansatz in der Testphase für die Einführung von Geschäftszielen im System ORM. Als Vorteil dieser Forderung lässt sich auch in diesem Fall anführen, dass sich auch die Datenqualität der Risiken verbessert, wenn sie mit Bezug auf *ein* Ziel formuliert werden müssen, weil sich ansonsten mehrere Risiken innerhalb eines Risikos verbergen würden.

Auch in diesem Fall lässt sich als Lösung anbieten, die Beschreibung von Risikoereignis (mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit) und Risikowirkung (mit einer Verlustverteilung in der Einheit eines KPI) zu trennen. Die Risikowirkungen könnten dann jeweils *höchstens ein* Ziel bedrohen. In dem obigen Beispiel mit einem Implementierungsrisiko in einem Kundenprojekt, das schließlich den Marktanteil gefährdet, könnte ein Ziel-KPI sich direkt auf den zu erreichenden Marktanteil für das Produkt beziehen. Die Risikowirkung, die in Marktanteilsverlusten quantifiziert wird, könnte in diesem Fall direkt auf das Marktanteils-Ziel bezogen werden. Würde beispielsweise ein weiteres Ziel lauten, bestimmte Kundenzufriedenheitswerte (gemessen z. B. in Punkten) zu erreichen, so wäre dieses durch das selbe *Risikoereignis* „Implementierungsprobleme“ bedingt. Die Auswirkungen des Risikos würden aber vermutlich zunächst als Verzögerung in Tagen gegenüber der ursprünglichen Zusage gemessen. Zwischen der in Tagen gemessenen Risikowirkung und dem in Punkten gemessenen Ziel-KPI müsste also eine weitere Umrechnung stattfinden. Wie fast alle verwendeten Informationen auch würde diese Umrechnung nur den Charakter einer annäherungsweise Schätzung haben können.

6.2.3.2 Zielhierarchie

Aufgrund des existierenden Zielsetzungsprozesses der SAP sollte sich jedes der Ziele der untergeordneten Einheiten auf die Ziele ihrer übergeordneten Einheit beziehen. Damit besteht idealerweise eine kaskadierende Zielhierarchie über das gesamte Unternehmen. Die Frage ist, ob diese Beziehungen zwischen den Zielen für Zwecke der Risikoaggregation genutzt werden können.

Es wäre theoretisch denkbar, nur auf der untersten möglichen Ebene die Wirkungen der Risiken auf die korrespondierenden Ziele zu beziehen und auf höheren Ebenen nur noch die Beziehungen der Ziele untereinander zu betrachten. Auf den höheren Ebenen wäre die Risikoinformation aber nur noch durch die Ziele vermittelt vorhanden. Letztlich sind die Ziele vor allem für die eigene Organisationsebene relevant; auf einer höheren Ebene ist es von größerem Interesse, welche konkreten Risiken die eigenen Ziele bedrohen. Der eigentliche Zweck des Risikomanagements, auf Risiken bezogene Maßnahmen (z. B. Mindern, Delegieren, Beobachten) optimal auszuwählen, könnte auf dieser Grundlage nicht erfüllt werden. Die Beziehung der Ziele untereinander ist auch nur qualitativ und teilweise abstrakt beschrieben, so dass sich die Zielhierarchie nicht für eine quantitative Aggregation eignet.

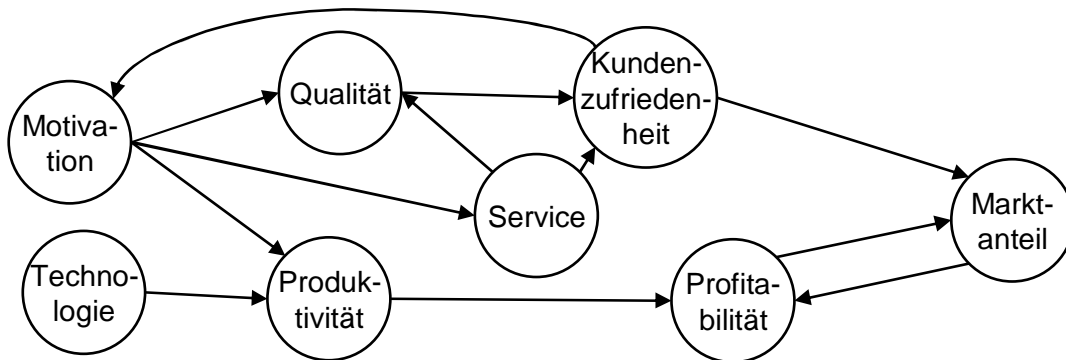


Abb. 6.2: Beispiel: Beziehung von Zielen untereinander

Ein weiteres Beispiel soll die Beziehung von Zielen und Risiken noch weiter beleuchten. In der Literatur finden sich auch Darstellungen einer Zielhierarchie, die Beziehungen von Zielen untereinander bereits auf der gleichen Organisationsebene aufweisen [GR05, S. 69]. Ein Beispiel ist in Abbildung 6.2 zu sehen. Bei einer kritischen Betrachtung zeigt sich jedoch, dass sich die Abhängigkeit der Ziele eigentlich aus der Abhängigkeit der Chancen und Risiken ergibt, die die Ziele unterstützen bzw. gefährden. Damit kann auf die explizite Modellierung eines Zusammenhangs zwischen den Zielen für die Risikoaggregation verzichtet werden, wenn die Abhängigkeiten an anderer Stelle berücksichtigt werden.

6.2.3.3 „Aggregat“-Entität

Im Rahmen einer ausschließlich zielorientierten Risikoberichterstattung würden alle Risiken in Bezug auf ein Ziel zusammengefasst. Weitere Kriterien zur Unterteilung, zum Beispiel Bezug zu einem bestimmten Kunden, Produkt oder Projekt könnten nur dann berichtet werden, wenn ein entsprechend zugeschnittenes Ziel existiert.

Wenn die Berichterstattung nicht nur an Zielen orientiert werden soll, müssen weitere „Sammelunkte“ für Risiken definiert werden, die für eine Zusammenfassung der möglichen Verluste von Interesse sind. Diese sollen als „Aggregatrisiken“ bezeichnet werden.

Nachdem die Entscheidung über die Bildung von weiteren Aggregationskategorien getroffen ist, stellt sich die eingangs beschriebene Frage nach der Kardinalität der Beziehung von Einzelrisiken zu Aggregatrisiken. Die flexibelste Lösung würde die Bildung mehrerer „Sichten“ erlauben, innerhalb derer die Risiken jeweils eindeutig zugeordnet werden müssten.

Etwas kompliziert wird es jedoch, wenn auch die „Aggregatrisiken“ in der Art auf Ziele bezogen werden sollen, dass die möglichen Verluste auf den Key Performance Indicator

eines Ziels bezogen werden sollen. Bereits der Bezug von Einzelrisiken auf Ziele erfordert teilweise die weitere Aufteilung der Verluste, um zu differenzieren, welcher Teil des Verlusts welches Ziel tatsächlich gefährdet. Wenn eine Zuordnung erst auf einer noch abstrakteren Ebene erfolgt, ist davon auszugehen, dass eine realistische Zuordnung von Aggregatrisiken zu einem KPI in der Regel nicht mehr möglich ist.

Um nicht sämtliche im System erfassten Risiken auf jeder Ebene neu zuordnen zu müssen, sollten in der Regel nur Ziele und (Einzel- sowie Aggregat-)Risiken auf der gleichen Organisationsebene miteinander in Beziehung gesetzt werden. Sollten für die Ziele auf einer höheren Ebene Risiken von niedrigeren Ebenen berücksichtigt werden, müsste ein Aggregatrisiko gebildet werden können, das die Verluste der darunterliegenden Einzelrisiken auf das gewünschte Ziel bezogen zusammenfasst. Dabei besteht aber wieder die Gefahr der doppelten Zählung eines Verlusts.

6.2.3.4 „Ziel“-Entität

Beim Formulieren der Ziele bestehen die in Abschnitt 3.3.4 auf Seite 31 genannten gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Zielsetzungs- und Risikomanagementprozess. Es muss geklärt werden, wie Risiken behandelt werden, die sich auf kein Ziel beziehen lassen. Folgende Ursachen für fehlende Ziele für ein Risiko sind denkbar:

1. Das Risiko bedroht ein implizites Ziel der Beteiligten, das noch nicht formuliert wurde,
2. das Risiko bedroht weder implizite noch explizite Ziele und ist damit kein Risiko oder
3. das Risiko bedroht fremde Ziele.

Die Konsequenz in Fall 1 ist, dass ein entsprechendes Ziel explizit formuliert werden muss. Ein Beispiel könnte ein Risiko sein, dessen Konsequenz wie folgt beschrieben ist: „Die Richtlinie xy wird verletzt“. Meistens wird implizit vorausgesetzt, dass es ein Ziel ist, bestehende Regeln einzuhalten. Soll die Gefahr eines solchen Risikos jedoch explizit auf ein Ziel bezogen werden, wird es notwendig, auch diese von allen akzeptierten Ziele explizit zu formulieren. Insgesamt müssten dazu viele implizite Ziele explizit formuliert werden.

Es könnte auch sein, dass die Gefahr eine Richtlinie zu verletzen, gar nicht an sich als Risiko angesehen wird. Dann ist Fall 2 gegeben. Soll die Risikofolge dennoch berücksichtigt werden, müssten stattdessen die Folgen der Regelverletzung beschrieben werden, die dann möglicherweise doch eigene Ziele bedrohen.

In Fall 3, wenn durch ein Risiko zwar keine eigenen, aber zum Beispiel die übergeordneten Unternehmensziele bedroht sind, sollte die Risikobeschreibung so aufgeteilt werden, dass die *Risikowirkung* in dem Bereich angesiedelt wird, in dem sie tatsächlich die eigenen Ziele des dortigen Bereichs bedroht. Ein Beispiel könnte das Risiko sein, dass zum Quartalsabschluss die Server ausfallen, auf denen die internen Rechnungslegungssysteme der SAP laufen. Das ist zunächst ein Risiko des Bereichs Hosting. Die größten Folgen würden aber das Gesamtunternehmen betreffen. Es ist kein Ziel der SAP Hosting, pünktlich Quartalszahlen liefern zu können, weshalb die *Risikowirkung* (im Gegensatz zum *Risikoereignis* „Serverausfall“) auch nicht bei der SAP Hosting angesiedelt werden darf.

Hier wird deutlich, dass die Verzahnung von Zielsetzungs- und Risikomanagementprozess sowohl die Qualität und Vollständigkeit der Zielbeschreibungen als auch die Relevanz der Risiken verbessern kann. Jedoch wird auch deutlich, dass niemals alle Ziele aller Beteiligten explizit erfasst werden können. Das ist auch ausdrücklich nicht der Zweck des Zielsetzungsprozesses; vielmehr sollen allgemein akzeptierte Ziele verbindlich festgehalten werden. Durch die Notwendigkeit, Risiken auf diese allgemeinen Ziele zu beziehen, wird sichergestellt, dass auch nur allgemein akzeptierte Risiken und keine Partikularinteressen im Risikomanagementprozess berücksichtigt werden.

6.2.3.5 Empfehlungen für einen stufenweisen Ausbau der Anwendung ORM

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, Empfehlungen abzugeben, die im Rahmen der existierenden Gegebenheiten im Global Risk Management Vorschläge für die schrittweise Erweiterung der Methodik geben, um die Aggregation der Risiken möglich zu machen und zu verbessern. Bisher wurden verschiedene Techniken vorgestellt, um die Risiken zu klassifizieren, zu quantifizieren, um Abhängigkeiten zu modellieren, Risiken zu aggregieren und das aggregierte Risiko zu messen.

Im Folgenden soll ein evolutionärer Weg aufgezeigt werden, entlang dem bestehende Prozesse und Informationen erweitert werden können. Es ist zu bedenken, dass jede Änderung des Risikomanagementprozesses einen erheblichen Aufwand bis zu ihrer vollständigen Implementierung mit sich bringt; der Aufwand für die reine Anwendungsentwicklung macht nur einen Teil des Gesamtaufwands aus.

Nutzung des Erwarteten Verlusts

Bereits jetzt bietet die Anwendung ORM die Möglichkeit, Risiken mit einem monetären Verlustwert (Total Loss) und einer Eintrittswahrscheinlichkeit zu versehen. In Abschnitt 4.2.1 wurden die Vor- und Nachteile des erwarteten Verlusts als Risikomaß erläutert. Vor diesem Hintergrund erscheint die Verwendung des erwarteten Verlusts für eine Aggregation der Risiken grundsätzlich als geeignet. Mit ihm können Risiken, Trends und Bereiche verglichen und sortiert werden. Sogar die Ermittlung risikoadjustierter Kapitalkostensätze (z. B. RAROC) ist grundsätzlich möglich. Sogar bestimmte Frühwarnfunktionen können mit Hilfe des erwarteten Verlusts realisiert werden.

Die Arbeit mit dem erwarteten Verlust legt die Grundlage für ein stärker quantitativ orientiertes Risikomanagement. Schlechte Datenqualität fällt sofort auf, wenn unerklärbar hohe oder niedrige Werte für den erwarteten Verlust auftreten. In einer ersten Phase müssen sich grundsätzliche Größenordnungen bei der Messung von Risiken etablieren. Liefert eine Aggregation aufgrund von Erwartungswerten offensichtlich falsche Ergebnisse, so ist davon auszugehen, dass keine andere Aggregationsmethode bessere Ergebnisse liefern kann.

Schaffen einer Klassifizierungsstruktur

Als Grundlage einer Aggregation muss festgelegt werden, welche Zielgrößen überhaupt berechnet werden sollen. Dazu wird eine Klassifizierung der Risiken benötigt. Anschließend müssen die Risiken den Kategorien zugeordnet werden, und es muss die Beziehung der Kategorien untereinander festgelegt werden.

Aufteilen der Risiken in mehrere Entitäten

Ein häufige Ursache für zu hohe erwartete Verluste ist die Beschreibung mehrerer Risiken mit gleicher Risikowirkung. In der derzeitigen Methode besteht ein Einzelrisiko aus einer Entität mit mehreren Feldern für Wahrscheinlichkeit und Verlusthöhe bzw. Condition (Bedingung) und Consequence (Auswirkung). Um den Fall abzubilden, dass ein Ereignis mehrere Auswirkungen hat oder dass mehrere Ereignisse zur gleichen Auswirkung führen, müssen derzeit mehrere Risiken angelegt werden, in denen sowohl die Bedingung als auch die Auswirkung jeweils noch einmal beschrieben ist.

Für mehrere Risiken mit der gleichen Auswirkung besteht zwar die Möglichkeit, diese zu gruppieren (diese Gruppen heißen in ORM „Grouped Risks“). Das bedeutet, dass die höchste einzelne Verlusthöhe der gruppierten Risiken als Gesamtverlusthöhe gilt; die gesamte Eintrittswahrscheinlichkeit ist die Gegenwahrscheinlichkeit dafür, dass keines der Risiken eintritt². Dadurch ergeben sich tendenziell sehr hohe Eintrittswahrscheinlichkeiten. Die so berechneten Werte können beim Anlegen eines Grouped Risk noch manuell angepasst werden.

Wie in Abschnitt 6.2.3 auf S. 90 erläutert bietet die Möglichkeit einer Aufteilung in Risikoereignisse und Risikowirkungen auch den Vorteil, dass bei einer Klassifizierung der Risiken die jeweiligen Anteile der Risikowirkung einfacher aufgespalten werden können, um sie der jeweiligen Kategorie zuzuordnen (z. B. bei einer Aufteilung in projekt- und kundenspezifisches Risiko). Auch die eindeutige Zuordnung von Risiken zu Zielen würde dadurch unterstützt (vgl. Abschnitt 6.2.3.3).

Erweitern der Quantifizierungsmöglichkeiten für Verluste und Integration von Simulationsfähigkeiten in die Anwendung

Weil ein singulärer Wert für die Schätzung der Verlusthöhe im Fall, dass ein Risiko eintritt, häufig nicht realistisch ist, stellt es eine Erleichterung für die Schätzenden da, wenn sie auch einen Bereich für die Verlusthöhe (Gleichverteilung) oder einen Minimal-, Modal- und Maximalwert angeben können (vgl. Abschnitt 5.1.1 auf S. 53).

Damit ist die Möglichkeit gegeben, Risiken durch stochastische Verteilungen zu beschreiben. Damit können auch andere Mikromodelle für die Risikoschätzung eingebunden werden, die ihre Ausgabe in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung liefern. Zunächst kann aus den Verteilungen wieder der Erwartungswert bestimmt werden, um die Berechnung des erwarteten Verlusts durchzuführen (vgl. Abschnitt 4.2.1). Später können die stochastischen Verteilungen auch die Grundlage für die Bestimmung einer Gesamtverlustverteilung mittels Monte Carlo Simulation (vgl. Abschnitt 4.3.2) bilden.

Erweitern der Referenzierungsmöglichkeiten

Anschließend wird die Abbildung und Analyse von Abhängigkeiten und Verkettungen relevant. Wie in Abschnitt 2.4.1 erwähnt, sieht auch das Institut der Wirtschaftsprüfer die Behandlung des Zusammenwirkens von Risiken als Notwendigkeit.

In Abschnitt 5.5 wurden zwei grundsätzliche Modelle für die Modellierung solcher Abhängigkeiten vorgestellt: die Erzeugung korrelierter Zufallszahlen und die Modellierung

² $P_{Grouped} = 1 - [(1 - P_{R_1}) \cdot \dots \cdot (1 - P_{R_n})]$ für n Einzelrisiken

von Kausalzusammenhängen zwischen Risikoereignissen mittels bedingter Wahrscheinlichkeiten, sowie eventuell von funktionalen Zusammenhängen zwischen der Höhe von Risikowirkungen. Beide Methoden müssen als komplex in der Anwendung gelten.

Zumindest eine Beschreibung von Zusammenhängen der Form „wenn Risiko A eintritt, wird B wahrscheinlicher“ sollte geschaffen werden - eine Referenz von Ursachen zu ihren Wirkungen. Für deren Quantifizierung bietet es sich an, das Instrumentarium aus dem Gebiet der Bayes-Netzwerke zu verwenden. Damit werden auch die Grundlagen für weitergehende Analysemöglichkeiten gelegt (vgl. Abschnitt 5.6.1). Eine gewisse Verknüpfung mehrerer *Risikowirkungen* ist bereits mit Hilfe von „Linked Risks“ möglich.

Ermöglichen weiterer Maßeinheiten für Risiken und Ziele

Um den quantitativen Einfluss von Risiken auf Ziele zu bestimmen, müssen die Risiken in den gleichen Einheiten gemessen werden wie die Ziel-KPIs. Oft ist die Quantifizierung von Risiken ohne direkte finanzielle Auswirkung, die nur eine vermittelnde Rolle spielen, schwer möglich. Um diesen Problemen zu begegnen sollte die Quantifizierung in anderen Maßeinheiten ermöglicht werden. (Vgl. auch Abschnitt 3.3.5 und Abschnitt 6.2.3.1 für die Quantifizierung von Zielen.)

Verbessern der Techniken zur Szenarioanalyse

Wenn die Voraussetzungen geschaffen sind, können durch Sensitivitätsanalysen (vgl. Abschnitt 5.6.2) und Berechnung von a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten in Bayes-Netzwerken (Abschnitt 5.6.1) Szenarioanalysen auf den erhobenen Daten durchgeführt werden.

Integration in die Planungsprozesse

Als letzte Ausbaustufe kann es gelten, wenn sämtliche Planungsprozesse als Chancen- und Risikomanagement verstanden werden, deren Ausgabe in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen direkt die Risikoinformationen enthält. Bevor ein solcher Ansatz praktikabel wird, sind jedoch noch viele Voraussetzungen zu schaffen. Das Thema wurde in Abschnitt 5.4 angeschnitten.

6.3 Strategisches Risikomanagement als Fortführung des Managements von Betriebsrisiken?

Ein häufige Forderung an ein gutes konzernweites Risikomanagementsystem ist die Operationalisierung des Risikomanagements, also der konkrete Bezug zum Geschäft und die Fallbezogenheit der Informationen [KPM03, S. 27]. Es wurde aufgezeigt, dass erhebliche Anstrengungen notwendig sind, um das operationale Risikomanagement im Hinblick auf strategische Fragestellungen auszuwerten, die für das Gesamtunternehmen von Bedeutung sind. In der Praxis gelebte Risikomanagementansätze auf Konzernebene setzen häufig erst auf einer abstrakteren Ebene an, auf der dann wenige große Risiken gut beschrieben werden. Solchen Methoden mangelt es jedoch am Bezug zur tatsächlichen Risikolage des Unternehmens; sie sind nicht sensibel gegenüber Entwicklungen, die aus der Organisation selbst kommen und sind abhängig von der Intuition und dem Netzwerk der Risikomanager, die sie anwenden.

Unzweifelhaft muss eine Risikomanagementmethode es auch zulassen, solche abstrakten Risiken zu beschreiben und aufzunehmen. Gleichzeitig wäre es aber eine vertane Chance,

das große Risikoinventar, in dem sich die täglichen Erfahrungen der operativ Handelnden widerspiegeln, unberücksichtigt zu lassen. Die Verknüpfung der dort abgelegten Einzelinformationen zu einem vernetzten Ganzen kann dabei helfen, die „gefühlten Risiken“ zu objektivieren und die Zusammenhänge der Einzelrisiken in nachvollziehbarer Weise zu dokumentieren. In Kombination mit erweiterten Analysemethoden wie Szenarioanalysen in Bayes-Netzwerken und die Bestimmung des aggregierten Risikos durch Monte Carlo Simulation wird das Risikoinventar zu einer Wissensbasis, die auch in der Lage ist, Entscheidungsunterstützung für das Management zu geben.

6.3.1 Einbettung in die Organisation

Wenn für die Unternehmensleitung zusätzliche Daten erhoben werden sollen, bedeutet das für die Mitarbeiter immer einen zusätzlichen Aufwand. Die Manager und Projektleiter, die an Risk Assessments teilnehmen, haben nicht unbegrenzt viel Zeit, um genaue Quantifizierungen für alle Risiken zu erarbeiten. Deshalb ist es wichtig, dass der Zweck der Übung transparent gemacht wird. Die beste Möglichkeit dazu ist es, die Risikoinformationen auf unterschiedlichen Ebenen für die Planung und Vorbereitung von Entscheidungen nutzbar zu machen, so dass das Risikomanagementsystem nicht nur ein weiteres Berichtssystem ist, das zur Erfüllung gesetzlicher Anforderungen dient, sondern ein Planungs- und Wissensmanagementsystem.

Daraus resultiert ein weiteres Problem: da die Risikoinformationen auf subjektiven Schätzungen basieren, muss eine Qualitätssicherung durch eine unabhängige Instanz erfolgen. Es besteht sonst die Gefahr, dass Risiken bewusst (oder sogar aus Routine) unter- oder übertrieben dargestellt werden, um auf Entscheidungen Einfluss zu nehmen. Dieses Problem besteht auch heute bereits, es ist keine besondere Eigenschaft eines unternehmensweiten, quantitativen Modells. Es ist auch keine Eigenschaft von Risikomanagement, sondern von Managementprozessen allgemein. Ein quantitatives Modell birgt nur zusätzliche Gefahren, wenn ein Manager den errechneten Zahlen blind vertraut, wo er sonst noch einmal nachgefragt hätte. Gerade die gute Dokumentation und Nachvollziehbarkeit in einer formalen Methode können aber auch dazu dienen, die Schätzungen langfristig zu kontrollieren und ihre Glaubwürdigkeit zu steigern.

7. Fazit

Abschließend sollen die Ergebnisse der Arbeit noch einmal zusammengefasst werden. In einem Ausblick werden weitere Fragen aufgezeigt, die meiner Ansicht nach eine eingehendere Betrachtung erfordern.

7.1 Zusammenfassung

Zunehmende gesetzliche und regulatorische Anforderungen machen ein zentrales Risikomanagement immer wichtiger. Die Konsolidierung der Risikolage für eine Berichterstattung auf der Grundlage qualitativ beschriebener Risiken ist ein zeitraubender und schwer dokumentierbarer Prozess. Eine toolgestützte Risikoaggregation ist deshalb nur mit quantitativen Methoden valide durchführbar. Nach einer Vorstellung der dafür benötigten mathematischen Konzepte wurden noch einmal die Charakteristika der qualitativen, halbquantitativen und quantitativen Beschreibung von Risiken herausgearbeitet.

Anschließend wurden die Grundlagen für eine Aggregation dargestellt. Dazu gehört die Klassifizierung der Risiken und die Einführung eines Maßes für aggregiertes Risiko. Der Value at Risk zeigte sich als einfach verständliches und dennoch ausdrucksstarkes Risikomaß. Als weitere Methode wurde die Monte Carlo Simulation ausführlich beschrieben, die heutzutage das Mittel der Wahl für fast jede Bestimmung einer Gesamtrisikoverteilung ist.

In einem weiteren Kapitel wurde beschrieben, wie die quantitative Beschreibung von Risiken mittels stochastischer Verteilungen verbessert werden kann. Das Thema der Modellierung von Abhängigkeit wurde ausführlich behandelt, weil es einerseits ein zentraler Faktor für die Erkennung von bestandsgefährdenden Entwicklungen ist und andererseits hier die größte Unsicherheit in der Praxis festgestellt wurde. Es wurde angeschnitten, wie die Risikoinformationen zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden können und wie Daten und Modell validiert werden könnten.

Abschließend wurde die Situation bei der SAP und bei anderen Unternehmen noch einmal unter verschiedenen Aspekten betrachtet, um konkrete Verbesserungsmöglichkeiten aufzuzeigen.

7.2 Ausblick

In aktuellen Beiträgen zum operationellen Risikomanagement wird häufig betont, dass die Entwicklung der Methoden in diesem Bereich noch am Anfang steht. Einige der Schwierigkeiten mit möglichen Lösungsansätzen wurden in dieser Arbeit erwähnt. Viele der vorgestellten Techniken konnten aufgrund des breiten Themenfeldes in dieser Arbeit aber nur in ihren Grundzügen skizziert und in den Kontext der Risikoaggregation eingeordnet werden. In der Literatur werden die verschiedenen Ansätze wie Simulation mit korrelierten Zufallszahlen und Bayes-Netzwerke mit diskreten Zufallsvariablen meist nebeneinander beschrieben. Es wurde gezeigt, dass eine Integration mehrerer Techniken möglich und auch sinnvoll ist. Jedoch sind die Wechselwirkungen bei der Integration stetiger Zufallsvariablen beliebiger Verteilungen in Bayes-Netzwerke nur in einer Richtung – nämlich von diskreten Ursachen zu stetigen Wirkungen – definiert. Um auch die Verlusthöhen in Szenariobetrachtungen einzubeziehen, müssen bessere Techniken, möglicherweise auf Grundlage von Sensitivitätsanalysen, gefunden werden.

Erheblicher Bedarf besteht auch für einzelne Modelle, die die Risikoquantifizierung für bestimmte Prozesse und Teilbereiche des Unternehmens genauer untersuchen, und deren Ergebnisse sich in eine konzernweite Risikoaggregation integrieren lassen. Bei der SAP betrifft das vor allem die Kernprozesse in der Softwareentwicklung und beispielsweise in den Bereichen Hosting, Vertrieb und IT-Sicherheit.

Literatur

- [Bas04] BASELER AUSSCHUSS FÜR BANKENAUF SICHT: *Internationale Konvergenz der Kapitalmessung und Eigenkapitalanforderungen*. Jun 2004 34, 43, 56
- [Bol98] BOL, Georg: *Wahrscheinlichkeitstheorie*. 3., vollst. überarb. u. erw. Aufl. München : Oldenbourg, 1998. – ISBN 3–486–24804–9 8, 9, 11, 13, 14, 15, 21, 39, 61
- [BT03] BRADLEY, Brendan O. ; TAQQU, Murad S.: Financial Risk and Heavy Tails. In: RACHEV, Svetlozar T. (Hrsg.): *Handbook of Heavy-Tailed Distributions in Finance*. Amsterdam : Elsevir, 2003, S. 35–103. – ISBN 0444508961 18
- [Cec04] CECH, Christian: Basel II: Die IRB-Formel zur Berechnung der Mindesteigenmittel für Kreditrisiko. In: *Wirtschaft und Management* (2004), Nov, 53–71. <http://basel2.fh-vie.at/v1/files/0041112135615.pdf> 43
- [CK99] CAPIŃSKI, Marek ; KOPP, Ekkehard: *Measure, Integral and Probability*. Berlin & Heidelberg : Springer, 1999. – ISBN 3–540–76260–4 8, 9
- [Coa37] COASE, Ronald H.: The nature of the firm. In: *Economica* 4 (1937), Nov, Nr. 16, S. 386–405 35
- [Cru02] CRUZ, Marcelo G.: *Modeling, Measuring and Hedging Operational Risk*. Chichester : John Wiley & Sons, 2002. – ISBN 0–471–51560–4 41, 75
- [Dec04] DECISIONEERING: *Crystal Ball 2000 User Manual*. Denver, Colorado, USA : Decisioneering, Inc., 2004 46, 63, 78
- [Deu05] DEUTSCHE TELEKOM AG: *Präsentation des Corporate Risk Management Modells*. 2005 26, 42
- [Die04] DIEDERICHS, Marc: *Risikomanagement und Risikocontrolling*. München : Vahlen, 2004. – ISBN 3–8006–3084–2 2
- [EMS99] EMBRECHTS, Paul ; MCNEIL, Alexander ; STRAUMANN, Daniel: *Correlation and Dependence in Risk Management: Properties and Pitfalls*. <http://www.math.ethz.ch/~strauman/preprints/pitfalls.pdf>. Version: Aug 1999. – Preprint ETH Zürich 62, 64, 65
- [EP05] ELING, Marting ; PARNITZKE, Thomas: *Dynamic Financial Analysis: Classification, Conception and Implementation*. Dez 2005 19

- [Eur05] EUROPEAN COMMISSION: *Impact Assessment Guidelines*. http://europa.eu.int/comm/secretariat_general/impact/docs/SEC2005_791_IA%20guidelines_annexes.pdf. Version: 06 2005. – Dokumentation des Impact Assessment Prozesses: http://europa.eu.int/comm/secretariat_general/impact/index_en.htm 76, 82
- [FGR01] FRACHOT, Antoine ; GEORGES, P. ; RONCALLI, Thierry: *Loss Distribution Approach for operational risk*. <http://gro.creditlyonnais.fr/content/wp/lda.pdf>. Version: 04 2001 57
- [Fie03] FIETZ, Axel: *Die Aggregationsproblematik im Risikomanagement am Beispiel operationeller Risiken*, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Diplomarbeit, Jun 2003 24
- [Gau04] GAULKE, Markus: *Risikomanagement in IT-Projekten*. 2., überarb. Aufl. München : Oldenbourg, 2004. – ISBN 3-486-27599-2 7
- [Gla03] GLAUSER, Manrico: *Messung von Marktrisiken unter Verwendung von Copula-funktionen*. 2003 64
- [Gle04a] GLEISSNER, Dr. W.: Auf nach Monte Carlo. In: *Risknews* 01 (2004), S. 31–37
- [Gle04b] GLEISSNER, Werner: Die Aggregation von Risiken im Kontext der Unternehmensplanung. In: *Zeitschrift für Controlling und Management* 48 (2004), Nr. 5, 350–359. <http://www.werner-gleissner.de/artikel/offiziell%20Nr.%20212%20Die%20Aggregation%20von%20Risiken%20im%20Kontext%20der%20U%20B4planung%20.pdf> 27, 39, 52, 56
- [GR05] GLEISSNER, Dr. W. ; ROMEIKE, Frank: *Risikomanagement: Umsetzung - Werkzeuge - Risikobewertung*. München : Haufe, 2005. – ISBN 3-448-06209-X 6, 62, 92
- [Hag04] HAGER, Peter: *Corporate Risk Management: Cash Flow at Risk und Value at Risk*. Frankfurt am Main : Bankakademie Verlag, 2004. – ISBN 3-933165-99-7 41, 45
- [HH05] HANSON, Kenneth M. ; HEMEZ, Francois M.: *Sensitivity Analysis of Model Output*. 2005 76
- [Hol04] HOLZAMER, Matthias: *Shareholder-Value-Management von Banken*. BOD DE GmbH, 2004. – ISBN 3-8334-1128-7 32
- [IC82] IMAN, R. ; CONOVER, W.: A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables. In: *Communications in Statistics—Simulation and Computation* 11 (1982), S. 311–334 50, 51
- [Jen00] JENSEN, Finn V.: *An introduction to Bayesian networks*. Repr. London : UCL Press, 2000. – ISBN 1-85728-332-5 21, 71
- [Jen01] JENSEN, Finn V.: *Bayesian networks and decision graphs*. New York : Springer, 2001. – ISBN 0-387-95259-4 66, 70, 72, 81
- [Jor97] JORION, Philippe: *Value at risk: the new benchmark for controlling market risk*. McGraw-Hill, 1997. – ISBN 0-7863-0848-6 41, 45

- [Jor01] JORION, Philippe: *Value at risk: the new benchmark for managing financial risk*. 2. ed. McGraw-Hill, 2001. – ISBN 0–07–135502–2 48
- [Kai04] KAISER, Dr. T.: Was und Wie? Effizienz und Effektivität verschiedener OpRisk-Management-Alternativen. In: *Risknews* (2004), Jun, S. 23–27 32
- [Kaj04] KAJÜTER, Peter: Die Regulierung des Risikomanagements im internationalen Vergleich. In: *Zeitschrift für Controlling und Management* (2004), Mär, S. 12–25 4, 5
- [KK04] KAISER, Thomas ; KÖHNE, Marc F.: *Operationelle Risiken in Finanzinstituten: Wege zur Umsetzung von Basel II und CAD 3*. Wiesbaden : Gabler, 2004. – ISBN 3–409–12495–0 23, 24, 25, 34
- [KN03] KÜHN, Reimer ; NEU, Peter: Functional Correlation Approach to Operational Risk in Banking Organizations. In: *Physica* 322 (2003), Mai, 650–666. <http://www.gloriamundi.org/picsresources/rkpn.pdf> 42, 66
- [Kno05] KNOBLOCH, Alois P.: Value at Risk: Regulatory and other applications, methods and criticism. In: FRENKEL, Michael (Hrsg.) ; HOMMEL, Ulrich (Hrsg.) ; RUDOLF, Markus (Hrsg.): *Risk Management: Challenge and Opportunity*. 2., rev. and enl. ed. Springer, 2005, S. 99–121. – ISBN 3–540–22682–6 41
- [Kon97] KONTIO, Jyrki: *The Riskit Method for Software Risk Management, version 1.00*. <http://www.sbl.tkk.fi/jkontio/riskittr.pdf>. Version: 1997 23, 24, 30, 31
- [KPM03] KPMG BUSINESS SERVICES: *Risikomanagement in deutschen Unternehmen*. http://www.kpmg.de/library/pdf/030514_Risikomanagement_in_deutschen_Unternehmen_de.pdf. Version: 03 2003 xii, 86, 87, 96
- [LK00] LAW, Averill. M. ; KELTON, W. D.: *Simulation Modeling and Analysis*. 3. Auflage. New York : McGraw-Hill, 2000. – ISBN 0–07–059292–6 46, 47, 66, 81, 82
- [Mei05] MEIER, Peter: *Risikomanagement in Technologieunternehmen: Grundlagen, Methoden, Checklisten und Implementierung*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag, 2005. – ISBN 3–527–50107–X 3, 4, 26, 28, 30
- [Mil05] MILDENHALL, Stephen J.: *Correlation and aggregate loss distributions with an emphasis on the Iman-Conover Method*. <http://www.mynl.com/wp/ic.pdf>. Version: Nov 2005 48, 49
- [Mun04] MUN, Johnathan: *Applied risk analysis: Moving beyond uncertainty in Business*. Hoboken, New Jersey : Wiley, 2004. – ISBN 0–471–47885–7 57
- [Nat05] NATIONAL RESEARCH COUNCIL: *The Owner's Role in Project Risk Management*. Washington, D.C. : The National Academic Press, 2005. – ISBN 0309547547 38
- [Nel99] NELSEN, Roger B.: *An Introduction to Copulas (Lecture Notes in Statistics)*. New York : Springer, 1999. – ISBN 0–387–98623–5 19, 65

- [Pea88] PEARL, Judea: *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. San Francisco, California : Kaufmann, 1988. – ISBN 0-934613-73-7 65, 66
- [Pro04] PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE: *A guide to the project management body of knowledge*. 3. ed., 2004. – Elektronische Ressource 6, 27
- [RAO05] *Risk Assessment vom 17.10.2005 im Entwicklungsbereich*. 2005 28
- [Reg05] REGIERUNGSKOMMISSION DEUTSCHER CORPORATE GOVERNANCE KODEX: *Deutscher Corporate Governance Kodex*. 06 2005. – Fassung vom 02. Juni 2005 5
- [RMF05] RACHEV, Svetlozar T. ; MENN, Christian ; FABOZZI, Frank J.: *Fat-Tailed and Skewed Asset Return Distributions: Implications for Risk Management, Portfolio Selection, and Option Pricing*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2005. – ISBN 0-471-71886-6 13, 19, 40, 41, 53, 55
- [Sal02] SALTELLI, Andrea: Sensitivity Analysis for Importance Assessment. In: *Risk Analysis* 22 (2002), Nr. 3, S. 1-12 76, 77
- [SAP04] SAP AG: *Geschäftsbericht 2004*. 2004 34
- [SAP05] SAP AG GLOBAL RISK MANAGEMENT: *Corporate Risk Management Model*. Sep 2005 2, 24, 25, 26
- [SRTC05] SALTELLI, Andrea ; RATTO, Marco ; TARANTOLA, Stefano ; CAMPOLONGO, Francesca: *Sensitivity Analysis Practices. Strategies for Model-Based Inference*. http://webfarm.jrc.cec.eu.int/uasa/doc/forum-tutorial/RESS_Tutorial.pdf. Version: 2005 76
- [SWN03] SANTNER, Thomas J. ; WILLIAMS, Brian J. ; NOTZ, William I.: *The Design and Analysis of Computer Experiments*. New York & Berlin : Springer, 2003. – ISBN 0-387-95420-1 78
- [Wal04] WALLMÜLLER, Ernest: *Risikomanagement für IT- und Software-Projekte: ein Leitfaden für die Umsetzung in der Praxis*. München & Wien : Hanser, 2004. – ISBN 3-446-22430-0 7
- [Wie04] WIEDEMANN, Arnd: *Risikotriade Zins-, Kredit- und operationelle Risiken*. Frankfurt am Main : Bankakademie, 2004. – ISBN 3-937519-18-1 49, 57, 58
- [Wor03] WORKING GROUP ON ECONOMIC CAPITAL MODELS: *Risk measurement within financial conglomerates: best practices by risk type*. Version: Feb 2003. <http://ideas.repec.org/p/dnb/ressup/51.html>. – Research Series Supervision (discontinued) 42
- [Zin01] ZINK, Helmut: Methoden des Kredit- und Länderrisikomanagements. In: BERNINGHAUS, Siegfried K. (Hrsg.) ; BRAULKE, Michael (Hrsg.): *Beiträge zur Mikro- und Makroökonomik*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2001, S. 505-515. – ISBN 3540423087 32

Schlagwortverzeichnis

- Abhängigkeit, 61
- Aggregation
 - Definition, 33
 - halbquantitativ, 28
 - qualitativ, 33, 34, 98
- Aggregatrisiko, 92
- Aktiengesetz, 4
- Basel II
 - Risikokategorien, 34
 - unerwarteter Verlust, 42–43
- Bayes
 - Satz von, 22
- Bayes-Netzwerk, 66–75
 - Grenzen, 69–71
- Betrachtungszeitraum, 28
- Collaborative Risk Assessment, 35
- Common Risks, 34, 37
- Condition, 25
- Consequence, 25
- Copula, 64
 - Einführung, 19
- Corporate Governance Kodex, 5
- Deutsche Telekom, 85
- Dichtefunktion, 10
- EBITDA, 29
- Entscheidungsgraph, 78
- Erwarteter Verlust, 38–40, 94
- Erwartungswert
 - bedingter, 22
 - Definition, 11
- Evidence, 71
- Fat Tails, 53, 54
- Forward Sampling, 71
- Halbquantitative Bewertung, 26–29
- Horizontale Prozesse, 35
- Impact, 25
- Klassen, 26
- Indicator, 25
- Inventarrisiko, 89
- Kausalität, 61, 65
- Key Performance Indicator, 32
- KonTraG, 4
- Korrelation, 61
 - Einführung, 15–18
 - Vergleich mit Kausalität, 63
- Korrelationsmatrix, 16
 - Anwendung, 62–63
 - gültige, 63
- Korrelationsmethode
 - Einschränkungen, 62
- Korrelationsmodell, 67–69
- Kovarianz, 15
- Kurtosis, 12
- Lineare Kongruenzgeneratoren, 46
- Linked Risk, 35
- Monte Carlo Simulation, 45
- Nutzenfunktion, 23, 27
- ORM
 - Sicherheit, 88
- P×I-Matrix, 27
- Parametrische Verteilungen, 55
- PMBOK, 6–7
- Quantifizierung
 - Dreiecksverteilung, 53–55
 - Gleichverteilung, 53
- Quantil, 13
- Randdichte, 14
- Randverteilung, 14
- Rangkorrelation, 18
- RAROC, 32
- Response, 25, 28, 36
- Risiko

- analyse
 - halbquantitativ, 25–27, 52, 84, 88
 - qualitativ, 6, 23, 36, 52, 58, 85
- bewertung
 - quantitativ, 23
- eigner, 35
- ereignis, 23
- faktor, 23
- kategorien, 34
- klassifikation, 34–37
- maße, 37–44
- niveau, 27
- wirkung, 23
- Definition, 2
- Risikomanagement
 - Fremdzweck, 3
 - Prozess
 - Modelle, 24
 - PMBOK, 6
 - Selbstzweck, 3
 - zielorientiertes, 30–32
- Risk Owner, 35
- RORAC, 32
- Schering, 84
- Schiefe, 12–13
- Sensitivität
 - ersten Grades, 77
 - n-ten Grades, 77
 - totale, 77
- Sensitivitätsanalyse, 76–78
- σ -Algebra, 8
- Spektraltest, 46
- Szenarioanalyse, 75
- Timeframe, 28
- TransPuG, 4
- Unabhängigkeit, 16, 19, 21
- Ursachen
 - interne und externe, 2
- Validierung, 81–83
- Value at Risk, 40–42
 - Aufsummieren, 61
 - Haltedauer, 41–42
 - Konfidenzniveau, 41, 42
 - Validierung, 81
- Varianz
 - Definition, 11
- Varianz-Kovarianz-Matrix, 16
- Varianz-Kovarianz-Modell, 44
- Vattenfall Europe, 85
- Verlustrhöhe
 - Streuung, 39–40
- Verlustverteilung
 - aggregierte, 54
- Verteilungsfunktion
 - Definition, 9
 - elliptische, 18–19
 - gemeinsame, 13
 - gemischte, 10
- Wahrscheinlichkeit
 - bedingte, 21–22, 67
 - Definition, 9
 - frequentistisch, 29
 - Klassen, 26
 - totale, 21
- Wahrscheinlichkeitsraum, 9
- Wahrscheinlichkeitsverteilung
 - bedingte, 66
- Worst Case, 39
- Zeitliche Bezüge, 28
- Zeitliche Staffelung, 29
- Ziele
 - Arten, 30
 - Entität, 93
 - hierarchische, 30
 - Quantifizierung, 31–32
- Zielhierarchie, 91
- Zufallsvariable
 - Definition, 9
 - diskrete, 9
 - multivariate, 13
 - stetige, 10
- Zufallszahlen
 - generieren, 46–51
 - gleichverteilte, 46
 - korrelierte, 48
 - nicht gleichverteilte, 47