

Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft

Professur für Landwirtschaftliche Produktionsökonomik

DIE PORTFOLIOTHEORIE ALS RISIKOMANAGEMENTANSATZ FÜR INVESTITIONEN IN BIOGASANLAGEN

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. agr.)
im Fachbereich Agrarwissenschaften, Ökotropologie und
Umweltmanagement der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von

M.Sc. Isatu Waag

geboren in Marburg an der Lahn

Gießen im September 2024

Prüfungskommission

1. Gutachter: Herr Prof. Dr. Joachim Aurbacher

2. Gutachterin: Frau Prof. Dr. Stephanie Hanrath

Prüfer: Herr Prof. Dr. Christian Herzig

Prüfer: Frau Prof. Dr. Ramona Teuber

Vorsitzender: Herr Prof. Dr. Gunter P. Eckert

Tag der Disputation: 13.09.2024

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand des Wissens und Literaturüberblick	5
2.1 Grundlagen und Anwendungsbeispiele der Portfoliotheorie als Risikomanagementansatz.....	5
2.1.1 Markowitz und der Portfolioeffekt	5
2.1.2 Rendite und Risiko als zentrale Entscheidungsparameter der Portfoliotheorie.....	6
2.1.2.1 Rendite messen und schätzen	6
2.1.2.2 Risiko messen und schätzen	9
2.1.3 Portfolioauswahl und -optimierung	12
2.1.4 Diversifikation im modernen Risikomanagement.....	17
2.1.5 Anwendungsbeispiele der Portfoliotheorie im Bereich der erneuerbaren Energien	21
2.2 Die Biogasanlage als Sachwertinvestition.....	27
2.2.1 Entwicklung des Anlagenbestands und Markt in Deutschland	27
2.2.2 Technologie und Funktionsweise einer Biogasanlage.....	30
2.2.3 Finanzierung und Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen	34
2.2.4 Risiken und Risikomanagement bei Investitionen in Biogasanlagen.....	39
2.3 Schlussfolgerungen und Formulierung der Hypothesen	48
3 Datengrundlage und Methode	51
3.1 Datengrundlage.....	51
3.1.1 Datenerhebung	51
3.1.2 Deskriptive Statistik	56
3.1.2.1 Rechtsform der Biogas-Gesellschaften	56
3.1.2.2 Anzahl der Jahresabschlüsse pro Biogas-Gesellschaft.....	56
3.1.2.3 Geografische Verteilung der Biogasanlagen	57
3.1.2.4 Alter der Biogas-Gesellschaften	58
3.1.2.5 Bilanzdaten	59

3.1.2.6	Erfolgskennzahlen	62
3.2	Methode	67
3.2.1	Schätzung der Parameter für die Portfolioanalyse	67
3.2.1.1	Stichprobenverteilung und Erwartungswert der Renditen	67
3.2.1.2	Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk als alternative Risikomaße.....	70
3.2.1.3	Schätzung der Kovarianz- und Korrelationsmatrix	71
3.2.1.3.1	Formeln für Stichprobenkovarianz und -korrelation.....	71
3.2.1.3.2	Umgang mit fehlenden historischen Renditewerten: Pairwise deletion	72
3.2.1.3.3	Umgang mit Schätzfehlern: Shrinkage Estimation	73
3.2.1.3.4	Umgang mit fehlenden Kovarianzwerten: Imputation...	76
3.2.1.3.5	Umgang mit einer nicht positiv semidefiniten Kovarianzmatrix: Nearest positive semidefinite Matrix.	77
3.2.2	Analyse des Portfolioeffekts	79
3.2.2.1	Portfolioeffekt bei Markowitz-Diversifikation	79
3.2.2.2	Portfolioeffekt bei naiver Diversifikation.....	83
3.2.2.3	Systematisches und unsystematisches Risiko der Biogasanlageninvestition	87
3.2.3	Erklärung der Modellparameter	88
3.2.3.1	Erklärung von Rendite und Risiko (SD, VaR, CVaR)	88
3.2.3.2	Erklärung der Korrelation.....	91
4	Ergebnisse	93
4.1	Ergebnisse der Parameterschätzung	93
4.1.1	Erwartungswert und Stichprobenverteilung der Renditen	93
4.1.2	Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk als alternative Risikomaße	96
4.1.3	Kovarianz- und Korrelationsmatrix.....	101
4.1.3.1	Stichprobenkovarianz und -korrelation bei Anwendung von „Pairwise deletion“	101
4.1.3.2	Ergebnisse der Shrinkage Estimation zur Reduzierung von Schätzfehlern.....	107
4.1.3.3	Ergebnisse der Imputation bei fehlenden Kovarianzwerten	111
4.1.3.4	Nearest positive semidefinit Matrix (Kovarianz und Korrelation)	114
4.2	Analyse des Portfolioeffekts	116
4.2.1	Portfolioeffekt bei Markowitz-Diversifikation	116
4.2.1.1	Effiziente Portfolios im Rendite-Risiko-Diagramm	116
4.2.1.1.1	Rendite-SD-effiziente Portfolios	116
4.2.1.1.2	Rendite-VaR-effiziente Portfolios	121
4.2.1.1.3	Rendite-CVaR-effiziente Portfolios.....	126

4.2.1.2	Gewichtung der Einzelanlagen in ausgewählten effizienten Portfolios	131
4.2.1.3	Kovarianzen der Biogasanlagen in effizienten Portfolios.....	134
4.2.2	Portfolioeffekt bei naiver Diversifikation.....	139
4.2.2.1	Beitrag von Einzelanlagen auf die Standardabweichung als Risikomaß eines Portfolios	139
4.2.2.2	Beitrag von Einzelanlagen auf den Value at Risk eines Portfolios	145
4.2.2.3	Beitrag von Einzelanlagen auf den Conditional Value at Risk eines Portfolios	149
4.2.3	Systematisches und unsystematisches Risiko der Biogasanlageninvestition	154
4.3	Erklärung der Modellparameter	159
4.3.1	Erklärung von Rendite und Risiko	159
4.3.1.1	Deskriptive Statistik der Variablen	159
4.3.1.2	Erklärung der Rendite	162
4.3.1.3	Erklärung der Standardabweichung	169
4.3.1.4	Erklärung des Value at Risk	175
4.3.1.5	Erklärung des Conditional Value at Risk	180
4.3.2	Erklärung der Korrelation	186
5	Diskussion der Ergebnisse und Fazit.....	196
5.1	Diskussion der Ergebnisse.....	196
5.1.1	Parameterschätzung.....	196
5.1.1.1	Stichprobenverteilung und Erwartungswert der Renditen	196
5.1.1.2	Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk als alternative Risikomaße.....	198
5.1.1.3	Kovarianz- und Korrelationsmatrix.....	199
5.1.2	Analyse des Portfolioeffekts	204
5.1.2.1	Portfolioeffekt bei Markowitz Diversifikation	204
5.1.2.2	Portfolioeffekt bei naiver Diversifikation.....	209
5.1.2.3	Systematisches und unsystematisches Risiko der Biogasanlageninvestition	211
5.1.3	Erklärung der Modellparameter	211
5.1.3.1	Erklärung von Rendite und Risiko	211
5.1.3.2	Erklärung der Korrelation	213
5.2	Fazit.....	213
6	Zusammenfassung	219
	Literaturverzeichnis	XII
	Anhang (CD-ROM/USB-Stick).....	XIX

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2: Exemplarische Unterscheidung von Renditen.....	7
Abbildung 3: Zusammenhang von Symmetrie und Risikoverständnis	10
Abbildung 4: Alternative Risikobegriffe und -maße	11
Abbildung 5: Möglichkeitenkurven in Abhängigkeit vom Korrelationskoeffizienten	13
Abbildung 6: Effizienzlinie.....	15
Abbildung 7: Kapitalmarktlinie	16
Abbildung 8: Mittelwert-VaR Effizienzkurve und Mittelwert-CVaR-Effizienzkurve.....	17
Abbildung 9: Risikomanagement-Prozess.....	18
Abbildung 10: Formen der Risikohandhabung	19
Abbildung 11: Portfoliorisiko in Abhängigkeit der Aktienanzahl.....	20
Abbildung 12: Das diversifizierbare Risiko von Windparks	22
Abbildung 13: Ergebnisse der Portfoliooptimierungsrechnungen.....	23
Abbildung 14: Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt [MW] in Deutschland.....	28
Abbildung 15: Verteilung der Anlagenzahl, der installierten elektrischen Anlagenleistung und der durchschnittlichen Anlagenleistung von Biogasanlagen in Deutschland auf Kreisebene	29
Abbildung 16: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland 2021	29
Abbildung 17: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus.....	31
Abbildung 18: Allgemeiner Verfahrensablauf bei der Biogasgewinnung.....	33
Abbildung 19: Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage	33
Abbildung 20: Traditionelle Kreditfinanzierung und traditionelle Projektfinanzierung.....	34
Abbildung 21: Anteilige Zusammensetzung der Anlagenfinanzierung ausgewählter Biogasanlagen	36
Abbildung 22: Vereinfachte Projektfinanzierungsstruktur am Beispiel erneuerbarer Energien.....	37
Abbildung 23: Durchschnittliche EEG-Vergütung für Biomasseanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2022 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde)	38
Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung und Verteilungsfunktion des Gewinns für den Beispielbetrieb.....	40

Abbildung 25: Bandbreiten des Gewinns bei der Simulierung einzelner Variablen und Veränderung der Verteilungsfunktion durch eine Optimierungsmaßnahme.....	41
Abbildung 26: Interne und externe Risiken zu den vier Phasen des Biogasprozesses.....	42
Abbildung 27: Verteilungsfunktion des Gewinns der drei Anlagen zu kumulierten Unsicherheitsbereichen.....	42
Abbildung 28: Positive Beeinflussung des Endwertes bei Inputabweichung von +10%	43
Abbildung 29: Negative Beeinflussung des Endwertes bei Inputabweichung von -10%.....	44
Abbildung 30: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Investitionsendwertes.....	44
Abbildung 31: Luftbild der Biogasanlage in Reppinichen	56
Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Jahresabschlüssen pro Biogas-Gesellschaft	57
Abbildung 33: Standorte der untersuchten Biogasanlagen	58
Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung der Biogas-Gesellschaften nach "Gründungsjahr" (erster veröffentlichter Jahresabschluss)	59
Abbildung 35: Deskriptive Statistik der Jahresergebnisse der Biogas-Gesellschaften in der Zeitreihe	63
Abbildung 36: Deskriptive Statistik der Eigenkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften	65
Abbildung 37: Deskriptive Statistik der Gesamtkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften...	67
Abbildung 38: Risikoloser Zins im April 2019	80
Abbildung 39: Verteilung der nicht normalverteilten Renditebeobachtungen.....	94
Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Erwartungswerte für die Rendite.....	95
Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen der historischen Renditen.....	97
Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung des Value at Risk der Renditen.....	99
Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung des Conditional Value at Risk der Renditen.....	101
Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung paarweiser Beobachtungen der Biogas-Gesellschaften	102
Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung der Kovarianzen bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen	104
Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung der Korrelationen bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen	106
Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der geschrumpften Kovarianzen im Vergleich zur ursprünglichen Schätzung.....	110

Abbildung 48: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Korrelationskoeffizienten vor (sample) und nach (shrinkage) der Shrinkage Estimation bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen	111
Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der „geschrumpften“ Kovarianzen vor und nach der Imputation fehlender Werte	113
Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzwerte im Vergleich zu den Kovarianzwerten der positiv semidefiniten Matrix, die die Frobenius Norm minimiert	115
Abbildung 51: Die Biogasanlagen der Stichprobe im Rendite-SD-Diagramm	117
Abbildung 52: Kurve der Rendite-SD-effizienten Portfolios	119
Abbildung 53: Die Biogasanlagen der Stichprobe im Rendite-VaR-Diagramm	122
Abbildung 54: Kurve der Rendite-VaR-effizienten Portfolios	124
Abbildung 55: Die Biogasanlagen der Stichprobe im Rendite-CVaR-Diagramm	127
Abbildung 56: Kurve der Rendite-CVaR-effizienten Portfolios	129
Abbildung 57: Gewichtung der Einzelanlagen in den effizienten Portfolios	132
Abbildung 58: Standardabweichung naiv diversifizierter Biogasanlagen-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße	139
Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der Risikoänderung (SD) durch die zusätzliche Investition bei unterschiedlichen Portfoliogrößen	142
Abbildung 60: Dichteschätzung der Varianzänderung bei verschiedenen Portfoliogrößen..	143
Abbildung 61: Value at Risk naiv diversifizierter Biogasanlagen-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße	145
Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der Risikoänderung (VaR) durch die zusätzliche Investition bei unterschiedlichen Portfoliogrößen	147
Abbildung 63: Dichteverteilung der Gesamtänderungen des Value at Risk bei unterschiedlichen Portfoliogrößen	148
Abbildung 64: Conditional Value at Risk naiv diversifizierter Biogasanlagen-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße	150
Abbildung 65: Häufigkeitsverteilung der Risikoänderung (CVaR) durch die zusätzliche Investition bei unterschiedlichen Portfoliogrößen	152
Abbildung 66: Dichteverteilung der Gesamtänderungen des Conditional Value at Risk bei unterschiedlichen Portfoliogrößen	153
Abbildung 67: Häufigkeitsverteilung der Gewichtungen der einzelnen Biogasanlagen im Marktindex	155
Abbildung 68: Häufigkeitsverteilung der Betafaktoren der Biogasanlagen	156
Abbildung 69: Systematisches und unsystematisches Risiko (SD) der Biogasanlagen	157

Abbildung 70: Anteile des systematischen und des unsystematischen Risikos (SD) am Gesamtrisiko der Biogasanlagen	158
Abbildung 71: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Rendite und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform	164
Abbildung 72: Änderung der Rendite in Abhängigkeit des Anlagevermögens	167
Abbildung 73: Änderung der Rendite in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote	168
Abbildung 74: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Standardabweichung und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform	171
Abbildung 75: Änderung der Standardabweichung in Abhängigkeit des Anlagevermögens	174
Abbildung 76: Änderung der Standardabweichung in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote	174
Abbildung 77: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Value at Risk und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform	177
Abbildung 78: Änderung des Value at Risk in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote.....	179
Abbildung 79: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Conditional Value at Risk und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform	182
Abbildung 80: Änderung des Conditional Value at Risk in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote.....	185
Abbildung 81: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Korrelation und den unabhängigen Variablen Differenz Anlagevermögen, Differenz Eigenkapitalquote, Differenz Alter, Differenz Region und Differenz Rechtsform.....	190
Abbildung 82: Änderung der Korrelation in Abhängigkeit der Differenz des Anlagevermögens	193
Abbildung 83: Änderung der Korrelation in Abhängigkeit der Differenz des Eigenkapitalanteils	194
Abbildung 84: Änderung der Korrelation in Abhängigkeit der Altersdifferenz.....	195
Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung des Value at Risk und des Conditional Value at Risk der Biogasanlagen im Vergleich	198

Tabellenverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tabelle 1: Portfolioeffekt der EBITDA-Prognose	25
Tabelle 2: Absolute und relative Änderung des Risikoniveaus.....	26
Tabelle 3: Verteilung und Leistung der Biogasanlagen nach Bundesländern	28
Tabelle 4: Wirtschaftlichkeit von Beispielanlagen in der Literatur	39
Tabelle 5: Übersicht über exogene und endogene Risiken.....	46
Tabelle 6: Risiken und ihre wirtschaftlichen Auswirkungen.....	46
Tabelle 7: Umschreibung der Größenklassen nach §§ 267 und 267a HGB	51
Tabelle 8: Übersicht zur Datenerhebung im Bundesanzeiger	52
Tabelle 9: Beispiele für die Firmierung von Biogas-Projektgesellschaften in der Rechtsform GmbH & Co. KG und deren Komplementärinnen.....	53
Tabelle 10: Gliederung der Bilanz gemäß § 266 Abs. 2 HGB	54
Tabelle 11: Deskriptive Statistik der Bilanzdaten	59
Tabelle 12: Maximales Anlagevermögen pro Biogas-Gesellschaft	60
Tabelle 13: Deskriptive Statistik des saldierten Eigenkapitals der Biogas-Gesellschaften	61
Tabelle 14: Deskriptive Statistik der Eigenkapitalquoten der Biogas-Gesellschaften	61
Tabelle 15: Deskriptive Statistik der Jahresergebnisse der Biogas-Gesellschaften.....	63
Tabelle 16: Deskriptive Statistik der Eigenkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften	64
Tabelle 17: Deskriptive Statistik der Gesamtkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften	66
Tabelle 18: Kategorisierung der Bundesländer in Regionen	90
Tabelle 19: Hypothesen zu den Variablen des Regressionsmodells	90
Tabelle 20: Renditeerwartung der Biogasanlagen BGA1 bis BGA10.....	95
Tabelle 21: Deskriptive Statistik der Erwartungswerte für die Rendite.....	95
Tabelle 22: Standardabweichung der Renditen der Biogasanlagen BGA1 bis BGA10.....	96
Tabelle 23: Deskriptive Statistik der Standardabweichungen der Renditen.....	96
Tabelle 24: Value at Risk der Renditen der Biogasanlagen BGA1 bis BGA10	98
Tabelle 25: Deskriptive Statistik des Value at Risk der Renditen.....	98
Tabelle 26: Conditional Value at Risk der Renditen der Biogasanlagen BGA1 bis BGA10 .	100

Tabelle 27: Deskriptive Statistik des Conditional Value at Risk der Renditen.....	100
Tabelle 28: Anzahl paarweiser Beobachtungen und Kovarianzen der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15	103
Tabelle 29: Deskriptive Statistik der Kovarianzen bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen	103
Tabelle 30: Anzahl paarweiser Beobachtungen und Korrelationskoeffizienten der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15	105
Tabelle 31: Deskriptive Statistik der Korrelationen bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen	105
Tabelle 32: Anzahl und prozentualer Anteil der Korrelationen je Kategorie bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen.....	107
Tabelle 33: Strukturierte Matrix F der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15	108
Tabelle 34: Schrumpfkongstante δ in Abhängigkeit der Teilstichprobengröße	108
Tabelle 35: Kovarianzmatrix nach Anwendung der Shrinkage Estimation der Biogasanlagen BGA 1 bis BGA15	108
Tabelle 36: Deskriptive Statistik der "geschrumpften" Kovarianzen im Vergleich zu den Stichprobenkovarianzen.....	109
Tabelle 37: Anzahl und prozentualer Anteil der „geschrumpften“ Korrelationen je Kategorie bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen	110
Tabelle 38: Anzahl paarweiser Beobachtungen und Kovarianzen nach Imputation fehlender Werte der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15.....	112
Tabelle 39: Deskriptive Statistik der „geschrumpften“ Kovarianzen vor und nach der Imputation sowie der imputierten Werte.....	112
Tabelle 40: Anzahl und prozentualer Anteil der „geschrumpften“ Korrelationen nach der Imputation fehlender Werte je Kategorie bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen	113
Tabelle 41: „Geschrumpfte“ und imputierte Kovarianzmatrix im Vergleich zur „nächsten“ positiv semidefiniten Kovarianzmatrix der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15.....	114
Tabelle 42: Deskriptive Statistik der „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzen im Vergleich zur „nächsten“ positiv semidefiniten Kovarianzmatrix	115
Tabelle 43: Anzahl und prozentualer Anteil der Korrelationskoeffizienten der positiv semidefiniten Matrix, die die Frobenius Norm minimiert bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen.....	116
Tabelle 44: Relative Risikoänderung ausgewählter Rendite-SD-effizienter Portfolios	119
Tabelle 45: Relative Risikoänderung ausgewählter Rendite-VaR-effizienter Portfolios	124
Tabelle 46: Relative Risikoänderung ausgewählter Rendite-CVaR-effizienter Portfolios	129

Tabelle 47: Einzelanlagen in effizienten Portfolios	132
Tabelle 48: Gewichtung der Einzelanlagen in den risikominimalen Portfolios und dem Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio.....	133
Tabelle 49: Deskriptive Statistik der Kovarianzen im Minimumvarianzportfolio	134
Tabelle 50: Kovarianzmatrix der Biogasanlagen im Minimumvarianzportfolio	135
Tabelle 51: Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz im Minimumvarianzportfolio	135
Tabelle 52: Deskriptive Statistik der Kovarianzen im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio.....	136
Tabelle 53: Kovarianzmatrix der Biogasanlagen im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio.....	136
Tabelle 54: Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio.....	136
Tabelle 55: Deskriptive Statistik der Kovarianzen im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk	137
Tabelle 56: Kovarianzmatrix der Biogasanlagen im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk	137
Tabelle 57: Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk.....	137
Tabelle 58: Deskriptive Statistik der Kovarianzen im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk	138
Tabelle 59: Kovarianzmatrix der Biogasanlagen im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk	138
Tabelle 60: Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk.....	139
Tabelle 61: Deskriptive Statistik der Standardabweichungen der Bestandsportfolios (Ausgangssituation)	140
Tabelle 62: Deskriptive Statistik der Standardabweichungen der Zufallsportfolios nach der zusätzlichen Investition	140
Tabelle 63: Deskriptive Statistik der Varianzänderung bei verschiedenen Portfoliogrößen .	144
Tabelle 64: Deskriptive Statistik des Value at Risk der Bestandsportfolios (Ausgangssituation)	145
Tabelle 65: Deskriptive Statistik des Value at Risk der Zufallsportfolios nach der zusätzlichen Investition	146
Tabelle 66: Deskriptive Statistik der Gesamtänderungen des Value at Risk bei unterschiedlichen Portfoliogrößen.....	149

Tabelle 67: Deskriptive Statistik des Conditional Value at Risk der Bestandsportfolios (Ausgangssituation)	150
Tabelle 68: Deskriptive Statistik des Conditional Value at Risk der Zufallsportfolios nach der zusätzlichen Investition	151
Tabelle 69: Deskriptive Statistik der Gesamtänderungen des Conditional Value at Risk bei unterschiedlichen Portfoliogrößen.....	154
Tabelle 70: Deskriptive Statistik der Gewichtungen der Biogasanlagen im Marktindex.....	155
Tabelle 71: Deskriptive Statistik der Betafaktoren.....	157
Tabelle 72: Deskriptive Statistik des systematischen und des unsystematischen Risikos der Biogasanlagen	158
Tabelle 73: Deskriptive Statistik der Anteile des systematischen und des unsystematischen Risikos am Gesamtrisiko der Biogasanlagen.....	159
Tabelle 74: Deskriptive Statistik der abhängigen und unabhängigen Variablen	159
Tabelle 75: Deskriptive Statistik der abhängigen Variablen nach Region	160
Tabelle 76: Deskriptive Statistik der abhängigen Variablen nach Rechtsform	160
Tabelle 77: Korrelationsmatrix der abhängigen und unabhängigen Variablen des Regressionsmodells.....	161
Tabelle 78: Ergebnistabelle der multiplen linearen Regression der Rendite	166
Tabelle 79: Ergebnistabelle der multiplen linearen Regression der Standardabweichung.	173
Tabelle 80: Ergebnistabelle der multiplen linearen Regression des Value at Risk.....	178
Tabelle 81: Ergebnistabelle der multiplen linearen Regression des Conditional Value at Risk	184
Tabelle 82: Deskriptive Statistik der abhängigen und unabhängigen Variablen	186
Tabelle 83: Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten bei gleichen und unterschiedlichen Rechtsformen.....	187
Tabelle 84: Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten bei gleichen und unterschiedlichen Bundesländern	187
Tabelle 85: Korrelationsmatrix der abhängigen und unabhängigen Variablen des Regressionsmodells.....	188
Tabelle 86: Ergebnistabelle der multiplen linearen Regression der Korrelation	192
Tabelle 87: Anpassungen der Stichprobenkovarianzen im Vergleich	200
Tabelle 88: Anpassungen der Korrelationen nach Kategorien im Vergleich	201
Tabelle 89: Vergleich von Value at Risk und Conditional Value at Risk der Biogasanlagen BGA161 und BGA145	207

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Das Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG) aus dem Jahr 2000 mit seinen Novellierungen in den darauffolgenden Jahren regelt die Anschluss- und Abnahmepflicht von Strom aus erneuerbaren Quellen und garantiert Erzeugern eine feste Einspeisevergütung für 20 Jahre. Als speicherbarer erneuerbarer Energieträger, der nicht nur Strom, sondern auch Wärme und Kraftstoff liefert, spielt Biogas eine besondere Rolle im Mix der erneuerbaren Energien (Daniel-Gromke et al., 2017).

Auch wenn mit der Novellierung des EEG im Jahr 2014 die Förderung für Biomasse drastisch abgesenkt wurde, was nahezu zum Erliegen des Neuzubaus von Biogasanlagen geführt hat, gibt es in Deutschland rund 10.000 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von ca. 6.000 Megawatt. Einen regelrechten Boom verzeichnete die Branche im Jahr 2011 mit einem Zubau von rund 1.500 Anlagen. Auch die durchschnittliche Leistung einer Biogasanlage ist in den vergangenen Jahren stetig gestiegen. Die durchschnittliche Anlagenleistung entwickelte sich von etwa 60 kW_{el} im Jahr 1999 über 360 kW_{el} (2010) auf fast 600 kW_{el} in 2020 (Fachverband Biogas e.V., 2023), wobei Größenordnungen von 1-2 MW nicht selten und vereinzelt auch bis zu 5 MW möglich sind (Schaper et al., 2008).

Die zahlreichen Investitionen der letzten Jahre in immer größere Biogasanlagen führten zu neuen Geschäfts- und Finanzierungsmodellen. Größere Anlagen erfordern höhere Investitionsvolumina und setzen entsprechende Mengen an Biomasse voraus. Während kleinere landwirtschaftliche Betriebe dabei an ihre Grenzen stoßen, investieren zunehmend Großbetriebe in Biogasanlagen, die über die notwendige Flächen- und Kapitalausstattung verfügen. Alternativ schließen sich Landwirte zu einer Betreibergesellschaft zusammen, um gemeinsam ein Biogasprojekt zu realisieren. In diese Gesellschaften werden häufig Kommunen, Energieversorger, Anlagenhersteller, Projektentwickler oder Finanzinvestoren aufgenommen, um das Eigenkapital für die Realisierung des Projektes bereitzustellen. Das unternehmerische Risiko wird auf die Gesellschafter verteilt (Schaper et al., 2008).

Ausgehend von stabilen Erträgen durch die gesetzlich garantierte Einspeisevergütung über 20 Jahre und Wirtschaftlichkeitsberechnungen, die stabile Gesamtkapitalrenditen von bis zu 16% in Aussicht stellen (Döhler et al., 2016, S. 163), sind Biogasanlagen für institutionelle und private Investoren zu einer attraktiven Anlagemöglichkeit geworden. Zahlreiche agrarökonomische Beiträge zur Risikoforschung bei Investitionen in Biogasanlagen sowie Presseartikel mit Titeln wie „Ein Drittel der Biogasanlagen im roten Bereich“ (Neumann, 2012), „Beim Biogas müssen Sie jetzt schärfer rechnen“ (Spandau, 2005) oder „Warum Biogasanlagen es schwer haben“ (Janssen, 2014) zeigen jedoch, dass sich in der Realität trotz der gesetzlich

garantierten Einspeisevergütung zahlreiche Einflussfaktoren positiv oder negativ auf den Betrieb der Biogasanlage auswirken. In Abhängigkeit von den äußeren Rahmenbedingungen ist Jahr für Jahr ein anderes Betriebsergebnis zu erwarten (Rauh et al., 2007, S. 3).

Gleichzeitig lassen sich auf dem Markt für Biogasanlagen Konsolidierungstendenzen erkennen. Es gibt zunehmend Marktteilnehmer, die mehrere Biogasanlagen betreiben und ihr Portfolio weiterhin ausbauen. EnviTec zum Beispiel betreibt 89 Biogasanlagen (EnviTec Biogas AG, 2023), BALANCE Erneuerbare Energien 40 Biogasanlagen (BALANCE Erneuerbare Energien GmbH, 2023) und die deutsche Agrarholding 22 Biogasanlagen (DAH Gruppe, 2023). Es stellt sich die Frage, ob die Portfoliobildung für Investoren aus Risikosicht Vorteile gegenüber der Einzelinvestition bietet.

Unter dem Motto „Don't put all your eggs in one basket“ hat Markowitz (1952) in den frühen 50ern mit der Portfoliotheorie die Entscheidung zur Portfoliobildung bei Wertpapieren begründet und ein Modell zur Optimierung von Wertpapierportfolios entwickelt. In der Finanzwirtschaft bietet die Portfoliotheorie eine Möglichkeit die finanziellen Vorteile einer Investition in eine geeignete Mischung aus mehreren Wertpapieranlagen gegenüber einer Einzelinvestition zu quantifizieren. In günstigen Fällen verringert sich das Gesamtrisiko eines Portfolios im Vergleich zu den Risiken der Einzeltitel.

Es stellt sich die Frage, ob sich die Erkenntnisse der Portfoliotheorie auf Investitionen in Biogasanlagen übertragen lassen. Ist es möglich, ein Portfolio bestehend aus mehreren Biogasanlagen so zusammenzustellen, dass entweder bei gleichbleibendem Risiko eine höhere Rendite oder bei einer gleichbleibenden Rendite eine Risikosenkung im Vergleich zur Einzelanlage erzielt werden kann?

Sowohl in der Praxis im Rahmen von Due Diligence Prüfungen sowie in den wissenschaftlichen Beiträgen zur Risikoforschung bei Investitionen in Biogasanlagen liegt der Fokus in der Regel auf der Einzelanlage und den damit verbundenen Risiken. Unter der Annahme, dass bei Investitionen in Biogasanlagen wie bei Wertpapieren ein Portfolioeffekt erzielt werden kann, wäre es von Vorteil bei Investitionsentscheidungen neben den Einzelrisiken auch den Einfluss von Einzelanlagen auf das Portfoliorisiko zu berücksichtigen.

1.2 Ziel der Arbeit

Aus der Problemstellung geht hervor, dass Eigen- und Fremdkapitalinvestoren eines Biogasprojektes erheblichen Risiken ausgesetzt sind. Häufig erfolgt im Rahmen der Investitionsentscheidung eine Analyse der Risiken lediglich auf Einzelprojektebene und nicht auf Portfolioebene.

Ziel ist es, die Portfoliotheorie aus ihrem eigentlichen Anwendungsgebiet der Finanzwirtschaft heraus auf eine Fragestellung der Agrarökonomie zu übertragen. Die Erkenntnisse der

Portfoliotheorie wurden seit ihrem Aufkommen auf verschiedene Anwendungsbereiche innerhalb sowie außerhalb der Finanzwirtschaft und nicht zuletzt auf Investitionen in erneuerbare Energien übertragen. In verschiedenen Arbeiten wurde insbesondere der Portfolioeffekt bei fluktuierenden Energieträgern wie Wind und Photovoltaik untersucht. Die Risikoforschung bei Investitionen in Biogasanlagen fokussiert bisher das Identifizieren von Einzelrisiken mit dem Ziel das investitionsspezifische Gesamtrisiko der Einzelanlage abzuleiten.

Die vorliegende Arbeit wiederum verfolgt das Ziel den Portfolioeffekt bei Investitionen in Biogasanlagen zu untersuchen und ergänzt damit die Anwendungsbeispiele der Portfoliotheorie im Bereich der erneuerbaren Energien. Gleichzeitig baut die Arbeit auf den Erkenntnissen der Risikoforschung bei Investitionen in Biogasanlagen auf und überträgt das Gesamtrisiko der Einzelanlage auf eine Portfolioebene.

Stellt man die praktischen Herausforderungen und Risiken der Biogasproduktion auf der einen Seite, der Portfoliotheorie als Risikomanagementansatz für Finanzinvestitionen auf der anderen Seite gegenüber, lässt sich die folgende zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit ableiten:

Wie und in welchem Umfang können Investoren durch Anwendung der Portfoliotheorie das Risiko-Rendite-Verhältnis bei Investitionen in Biogasanlagen positiv beeinflussen?

Als Sachanlage unterscheidet sich eine Biogasanlage wesentlich von einer Finanzanlage. Demnach besteht das erste Teilziel der Arbeit darin, die Anwendbarkeit der Portfoliotheorie als Risikomanagementansatz hinsichtlich Investitionen in komplexe Sachanlagen wie Biogasanlagen zu untersuchen. Ein weiteres Teilziel besteht darin, den Portfolioeffekt bei Investitionen in Biogasanlagen zu quantifizieren und damit das zu beobachtende Anlageverhalten zu begründen. Sofern sich durch Portfoliobildung positive Auswirkungen auf das Risiko-Rendite-Verhältnis der Investition nachweisen lassen, besteht das dritte Teilziel darin an Investoren gerichtete praxisnahe Handlungsempfehlungen zur Portfoliooptimierung abzuleiten.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der vorliegenden Arbeit folgt wie in Abbildung 1 dargestellt, dem klassischen Aufbau einer empirischen Arbeit. Zunächst wird in der Einleitung die Relevanz des Themas begründet, die Forschungslücke definiert und eine konkrete Forschungsfrage abgeleitet. Dem empirischen Teil der Arbeit ist ein theoretischer Teil vorangestellt, in dem der Stand des Wissens skizziert ist. Dabei baut die vorliegende Arbeit zum einen auf den Erkenntnissen sowie Anwendungsbeispielen der Portfoliotheorie und zum anderen auf den Erkenntnissen zum Risikomanagement bei Investitionen in Biogasanlagen auf. Aus der Gegenüberstellung der beiden Forschungsgebiete lassen sich Schlussfolgerungen hinsichtlich der Anwendbarkeit eines finanzwissenschaftlichen Modells als Risikomanagementansatz für Investitionen in

Biogasanlagen ableiten. Diese münden in drei Hypothesen, deren Überprüfung dazu dient die übergeordnete Forschungsfrage zu beantworten.

Die empirische Herangehensweise setzt eine Datenbasis voraus, welche dazu dient, für die zunächst noch freien Modellparameter konkrete Zahlenwerte zu bestimmen. Die Datengrundlage sowie das methodische Vorgehen zur Bearbeitung der Hypothesen wird im dritten Kapitel beschrieben.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Analyse sind im vierten Kapitel dargestellt, wobei jeder Hypothese ein Unterkapitel gewidmet ist. Die Parameterschätzung stellt dabei die Basis für die Analyse des Portfolioeffekts und die Erklärung der Modellparameter dar.

Die im vierten Kapitel beschriebenen Ergebnisse werden im fünften Kapitel besprochen und konkrete Handlungsempfehlungen für Investoren abgeleitet. Im Fazit werden die Hypothesen abschließend angenommen oder abgelehnt und die Forschungsfrage beantwortet. Zu guter Letzt wird die gesamte Arbeit in Kapitel 6 zusammengefasst.

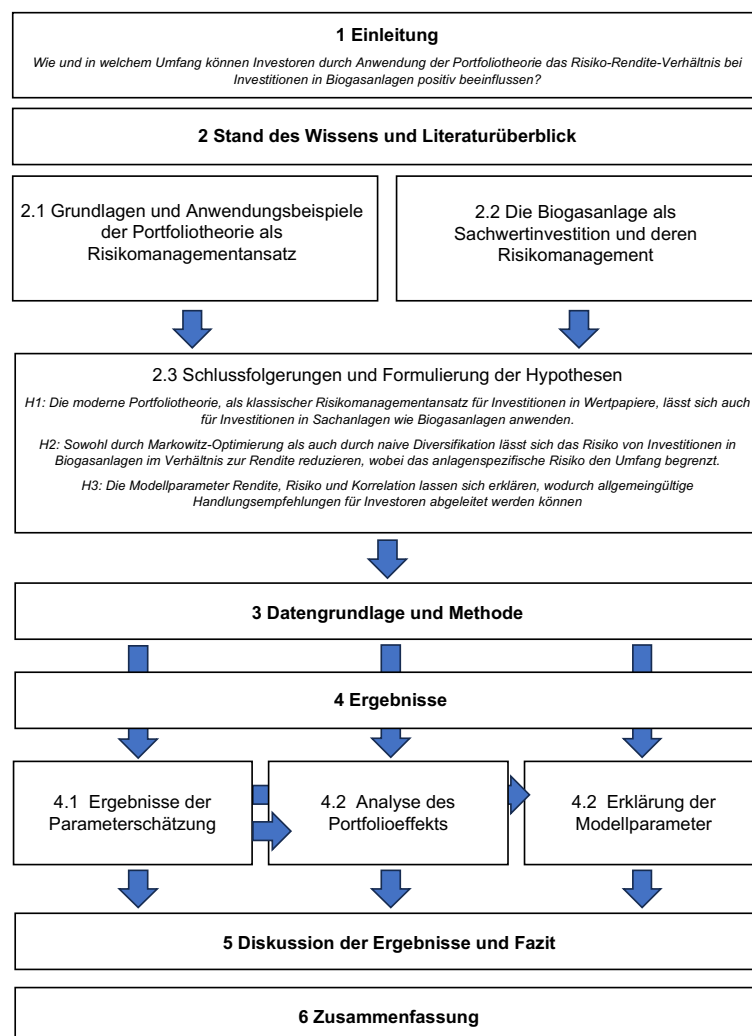


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit
Quelle: Eigene Darstellung

2 Stand des Wissens und Literaturüberblick

2.1 Grundlagen und Anwendungsbeispiele der Portfoliotheorie als Risikomanagementansatz

2.1.1 Markowitz und der Portfolioeffekt

In der einschlägigen Literatur gilt Harry M. Markowitz als (Mit-)Begründer der Portfoliotheorie und Pionier des quantitativen Portfoliomanagements. Im Jahr 1952 veröffentlichte Markowitz im finanzwissenschaftlichen Magazin „Journal of Finance“ seine wissenschaftlichen Erkenntnisse über das Investitionsverhalten an Kapitalmärkten (z.B. Aktienmärkten). Bis dahin beschränkten sich die Ansätze zur Auswahl von unterschiedlichen Anlagealternativen hauptsächlich auf eine vollkommen isolierte Betrachtung von Wertpapiererträgen (Ernst & Schurer, 2015, S. 205 f.). Die Rendite einer Anlage galt bis dahin weitgehend als einziges Selektionskriterium für die Portfoliozusammenstellung. Im Jahr 1990 erhielt Markowitz den Wirtschaftsnobelpreis, was die Bedeutung seiner Arbeit unterstreicht (Garz et al., 2006, S. 20 f.; Ernst & Schurer, 2015, S. 206).

Markowitz (1952) widerlegte die Hypothese oder Maxime, nach der ein Investor ausschließlich diskontierte Erträge maximieren sollte. Er argumentierte, dass diese Aussage in keinem Fall die Vorzüglichkeit eines diversifizierten Portfolios gegenüber einem nicht diversifizierten Portfolio beinhalte. Im Gegenteil, die „Regel“ impliziere, dass ein Investor sein gesamtes Vermögen in das Wertpapier investiert, von dem er sich die höchste Rendite verspricht, ungeachtet des Risikos, mit dem die Anlage verbunden ist. Wenn also zwei oder mehr Wertpapiere die gleiche Rendite erwarten lassen, ist eine Investition in das eine Wertpapier genauso gut wie die Investition in das andere Wertpapier oder in jede Kombination dieser Wertpapiere. Da Diversifikation jedoch zu beobachten und durchaus sinnvoll ist, entwickelte Markowitz einen quantitativen Optimierungsansatz, der bei der Auswahl eines Portfolios ein Abwägen zwischen erwarteter Rendite und möglichen Risiken berücksichtigt.

Mit der Entwicklung des Portfolio-Selection Modells von Markowitz gelang die explizite Berücksichtigung des Risikos von Wertpapieranlagen. Gleichzeitig konnte die bis dahin vorherrschende eindimensionale Betrachtungsweise (Rendite) durch die bis heute aktuelle zweidimensionale Betrachtung ersetzt werden (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 85; Ernst & Schurer, 2015, S. 205). Markowitz argumentiert, dass ein Portfolio bestehend aus riskanten Anlagealternativen noch lange kein riskantes Portfolio sein muss (Garz et al., 2006, S. 21). Während sich die Rendite eines Portfolios aus den (gewichteten) Renditen seiner einzelnen Bestandteile, d.h. Wertpapiere, ergibt, liegen die Risiken für diversifizierte Portfolios unter der Summe der Risiken der Einzelwerte (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 78). Dieser Zusammenhang wurde von Markowitz dargestellt und wird als Diversifikations- oder Portfolioeffekt

bezeichnet. Durch eine Kombination von Anlagen, die möglichst schwach miteinander korrelieren, gleichen sich einzelne negative mit zeitgleichen positiven Wertentwicklungen anderer Anlagen aus (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 78). Die wichtigsten Determinanten des Modells nach Markowitz sind demnach, die Rendite, das Risiko und die Korrelation einzelner Wertpapiere (Ernst & Schurer, 2015, S. 208).

2.1.2 Rendite und Risiko als zentrale Entscheidungsparameter der Portfoliotheorie

2.1.2.1 Rendite messen und schätzen

Der Begriff „Rendite“ definiert das Anlageergebnis in Relation zum eingesetzten Geldbetrag. Da es sich bei der Rendite um das Verhältnis eines Endbetrags zu einem Anfangswert handelt, wird diese häufig als Prozentzahl angegeben (Spremann, 2008, S. 71; Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 4; Ernst & Schurer, 2015, S. 67). Die Basisformel für die Berechnung der Rendite lautet (Garz et al., 2006, S. 329; Ernst & Schurer, 2015, S. 68; Fischer B. R., 2010, S. 6):

$$R = \frac{K_1 - K_0}{K_0} = \frac{K_1}{K_0} - 1$$

Mit: R = Gesamtrendite oder auch Total Return der Einzelanlage
 K_0 = Anfangsbetrag (Kurs einer Anlage) zu Periodenbeginn $t = 0$
 K_1 = Anlageergebnis (Kurs einer Anlage) zum Periodenende $t = 1$

Die Erträge wie zum Beispiel Zinsen oder Dividenden werden hierbei unter K_1 subsumiert. Spremann (2008, S. 72), Bruns & Meyer-Bullerdiek (2013, S. 4 und 717) und Fischer (2010, S. 6) berücksichtigen derartige Zahlungen als exogene Mittelbewegungen und weisen in der Betrachtungsperiode zu- oder abgeflossene Zahlungen Z separat aus:

$$R = \frac{K_1 + Z - K_0}{K_0} = \frac{K_1 + Z}{K_0} - 1$$

Die Bezeichnungen „einfache Rendite“ oder „Gesamtrendite“ (engl. Total return) werden häufig synonym verwendet. Bei der beschriebenen Basisformel zur Berechnung der Rendite handelt es sich um die diskrete Rendite. Der Anlagezeitraum beträgt eine Periode und ist durch zwei einzelne oder „diskrete“ Zeitpunkte (Beginn und Ende) beschrieben. Es spielt keine Rolle, zu welchem Zeitpunkt die jeweiligen Vermögensänderungen in der Vergangenheit erfolgten, da lediglich das prozentuale Endergebnis für den Anlagezeitraum ermittelt wird. Zinseszinsseffekte werden nicht berücksichtigt (Spremann, 2008, S. 72; Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 717; Ernst & Schurer, 2015, S. 68).

Darüber hinaus lassen sich Renditegrößen nach weiteren Kriterien charakterisieren. Eine umfassende Übersicht stellen Bruns & Meyer-Bullerdiek (2013, S. 3) dar. Sie unterscheiden wie

in Abbildung 2 dargestellt inhaltliche und methodische Charakteristika. Für die inhaltliche Ausgestaltung der Rendite spielen die Zielsetzung sowie die spezifischen Anlagebedingungen des Anlegers eine entscheidende Rolle. Aus den inhaltlichen Überlegungen folgt häufig das methodische Vorgehen bei der Berechnung der Renditen.

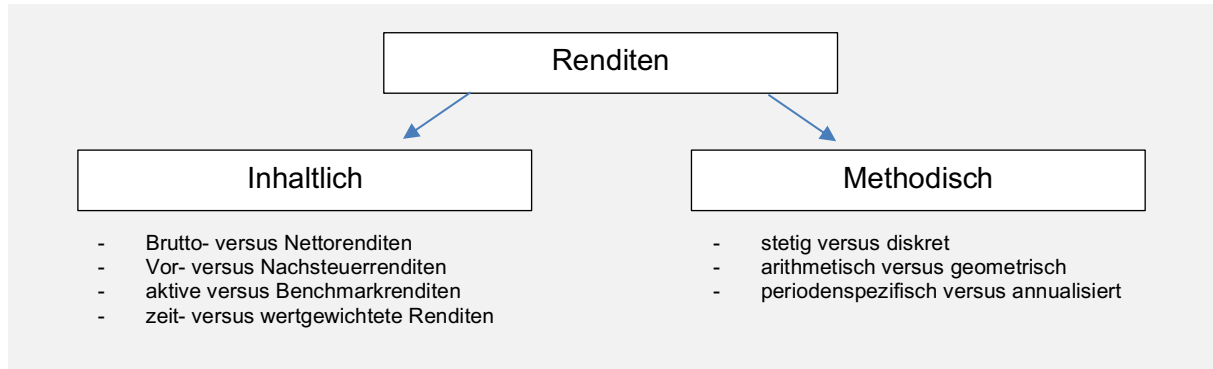


Abbildung 2: Exemplarische Unterscheidung von Renditen
Quelle: in Anlehnung an Bruns & Meyer-Bullerdiek (2013, S. 3)

Der Verwendungszweck der Rendite findet sich dabei einerseits in der rückblickend in Beurteilung einer historischen Wertentwicklung und andererseits in der Einschätzung und Prognose einer zukünftigen Wertentwicklung wieder (Ernst & Schurer, 2015, S. 67). In der Rückschau auf eine abgelaufene Anlageperiode soll die Rendite ausdrücken, wie gut es mit der Investition gelungen ist, einen seinerzeit gegebenen Geldbetrag in das Anlageergebnis zu transformieren. In der Vorschau auf eine zukünftige Periode soll die Rendite vermitteln, wie gut es gelingen dürfte, einen heutigen Geldbetrag in ein späteres Ergebnis zu transformieren. Im Rückblick ist die Rendite in der Regel bekannt. In der Vorschau ist die Rendite in der Regel noch unsicher (Spremann, 2008, S. 71).

Markowitz beschreibt in seiner Veröffentlichung von 1952, dass der Prozess der Portfolioauswahl aus zwei Teilen bestehe. Der erste Teil beziehe sich auf die Vorstellungen über die zukünftige Entwicklung verfügbarer Wertpapiere. Die Annahmen über die Entwicklung verfügbarer Wertpapiere wiederum bilde die Grundlage für den zweiten Teil, der in der Auswahl eines Portfolios münde. Markowitz betont, dass sich seine Arbeit ausschließlich auf den zweiten Teil beziehe (Markowitz, 1952). Zur Beschreibung der zu erwartenden Rendite verschiedener Anlagealternativen greift Markowitz auf den statistischen Ertragsparameter „Erwartungswert der Rendite“ zurück (Maier, 2007, S. 215 f.).

$$E(R_i) = \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$$

Aus arithmetischer Sicht sind historische Durchschnittswerte und der Erwartungswert einer Zufallsvariable sowie der Erwartungswert eines unsicheren Ereignisses identisch (Markowitz, 2008, S. 56 f.). Spremann (2008, S. 121 ff.) behauptet Forscher seien zu der Überzeugung

gelangt, das von Markowitz angenommene Urnenmodell besitze höchste Realitätsnähe. Danach sind Renditen zufällig und entstehen für ein jedes Wertpapier so, als ob Periode für Periode in unabhängiger Weise aus ein und derselben Wahrscheinlichkeitsverteilung gezogen wird. Das arithmetische Mittel als Schätzer für unbekannte Renditeerwartungen sei geeignet, da er die folgenden erwünschten Eigenschaften aufweist:

1. Erwartungstreue: Bei oftmaliger Anwendung des Schätzers wird im Mittel der gesuchte Parameter getroffen (Gesetz der großen Zahl). Der Schätzer ist demnach unverzerrt.
2. Minimale Varianz: Auch wenn der Schätzer im Mittel trifft, soll er im Einzelfall nicht zu weit links oder rechts daneben liegen.
3. Konsistenz: Die Schätzung wird genauer, wenn der Stichprobenumfang vergrößert wird.

Specht & Gohout (2009, S. 91) schreiben dem dargestellten Schätzer für die Rendite zusätzlich die Eigenschaften der Normalverteilung und der Suffizienz zu.

Als alternative Schätzmethode beschreibt Spremann (2008, S. 132) außerdem das Resampling-Bootstrapping. Bei diesem Verfahren werden im Rahmen einer Simulation historische Renditen dazu verwendet künstlich neue Szenarien zu erzeugen, die sich ebenso hätten ereignen können. Die so erzeugten Datensätze werden dann verwendet, um die Wahrscheinlichkeitsverteilung und ihre Parameter zu schätzen.

Neben der historischen Entwicklung einzelner Wertpapiere beschreibt Markowitz wiederum eine weitere Quelle für Informationen, die als Rohmaterial für die Portfolioanalyse genutzt werden können: Die Meinungen eines oder mehrerer Analysten über die zukünftige Kursentwicklung (Markowitz, 2008, S. 4). Die Methoden, mit deren Hilfe ein Analyst zu fundierten Aussagen über Wertpapiere kommt, seien jedoch kein Bestandteil seiner Arbeit, da Portfolioanalyse da beginne, wo Wertpapieranalyse aufhöre (Markowitz, 2008, S. 31).

Auch Breuer et al. (2010, S. 240) gehen nicht darauf ein, wie Analysten zu fundierten Aussagen über zukünftige Kursentwicklungen kommen, beschreiben aber wie Expertenwissen im Rahmen der Portfolioanalyse genutzt werden kann. Sie unterscheiden dabei die Analystenerwartungen und die Markterwartungen hinsichtlich zukünftiger Renditen. Außerdem gehen Sie auf einen multivariaten Ansatz ein, der in der Lage ist, die über verschiedene Verfahren ermittelten Schätzwerte für erwartete Wertpapierrenditen in einem Gesamturteil zu verdichten.

Bruns & Meyer-Bullerdiek (2013, S. 177 ff.) betonen ebenfalls die Komplexität der Erarbeitung von Prognosen. Sie beschreiben aber dennoch, die häufigste zur Anwendung gelangende Prognosemethode, nämlich die kausale Deduktion von Kurs- und Marktentwicklungen. Der Schwerpunkt dieses ökonomisch qualitativen Arbeitens liege auf der Interpretation von Informationen durch Analysten und Portfoliomanager. Gerade in der Fähigkeit zur Interpretation

von Informationen zeige sich die Stärke des menschlichen Gehirns gegenüber algorithmischen Verfahren. Kreativität, Phantasie und Intuition spielen bei diesem Ansatz eine wichtige Rolle.

Neben der Statistik und der Prognostik nennen Bruns & Meyer-Bullerdiek die Prophetie als dritte Vorhersagemethodik. Prophezeiungen, die von Propheten oder so genannten Börsengurus abgegeben werden, seien jedoch durch das Fehlen von Nachprüfbarkeit der Vorhersage gekennzeichnet und dadurch für das Portfoliomanagement nicht geeignet.

Unabhängig davon, wie man zu einer Vorstellung über die zukünftige Entwicklung von Wertpapieren kommt, lässt sich die erwartete Portfoliorendite μ_p durch die Addition der mit ihren Portfolioanteilen x_i gewichteten (erwarteten) Einzelrenditen μ_i berechnen (Garz et al., 2006, S. 34):

$$\mu_p = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu_i$$

Markowitz (2008, S. 5 f.) beschreibt, dass die Portfolioanalyse für Investoren geeignet sei, die hohe Kapitalrückflüsse, also Renditen, erzielen wollen. Die Definition von „Rückfluss“ könne von Investor zu Investor variieren, doch sie alle bevorzugen es, wenn er höher ausfällt. Ein weiteres Ziel der von ihm beschriebenen Investoren sei es, dass dieser Rückfluss verlässlich und stabil eintritt und nicht unsicher sei. Damit beschreibt Markowitz neben dem Rückfluss bzw. der Rendite einen weiteren für die Portfolioanalyse obligatorischen Parameter: das Risiko.

2.1.2.2 Risiko messen und schätzen

Im Gegensatz zur Rendite wird in der Literatur keine einheitliche Definition des Risikobegriffs verwendet (Wolke, 2016, S. 31; Vanini, 2012, S. 7; Ernst & Schurer, 2015, S. 83). Selbst über die Wortherkunft herrscht Uneinigkeit (Romeike, 2018, S. 8). Jonen (2007) unterzieht in seinem Beitrag den Risikobegriff einer umfassenden semantischen Analyse. Er begründet die unterschiedliche Verwendung des Begriffs unter anderem damit, dass es sich beim Risiko gleichermaßen um einen alltagssprachlichen Begriff und um ein wissenschaftliches Konzept handelt, welches wiederum in verschiedenen Disziplinen verwendet werde (Jonen, 2007, S. 7).

Umgangssprachlich wird Risiko als ein möglicher negativer Ausgang einer Handlung oder Aktivität verstanden, der materielle oder körperliche Schäden, Nachteile sowie Verluste zur Folge haben kann (Brockhaus Enzyklopedie online, 2023). Darauf aufbauend folgt Romeike (2018, S. 8 f.) der Definition von Gleißner (2011) und beschreibt Risiken als „die aus der Unvorhersehbarkeit der Zukunft resultierenden, durch „zufällige“ Störungen verursachten Möglichkeiten, von geplanten Zielwerten abzuweichen“. Romeike (2018) schlussfolgert, dass Risiken daher auch als „Streuung“ um einen Erwartungs- oder Zielwert betrachtet werden können. Damit

begründet und folgt er Markowitz' Definition von Risiko. Markowitz bezeichnet den Erwartungswert der diskreten Rendite für die zugrunde gelegte Anlageperiode als Return und die Standardabweichung als Risiko (Spremann, 2008, S. 101). Das Streuungs- bzw. Risikomaß Standardabweichung σ ist definiert als die Quadratwurzel der Varianz σ^2 (Maier, 2007, S. 38):

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - \mu)^2}$$

Die Standardabweichung beschreibt mit welchen positiven wie auch negativen Abweichungen vom Erwartungswert der Rendite zu rechnen ist. Sie beschreibt also mögliche Verluste, die es zu vermeiden gilt, aber auch mögliche Gewinne, die wiederum gewollt sind. Die Diskussion darüber ob auch mögliche Gewinne unter dem Begriff „Risiko“ zu subsumieren sind, hat zu der in Abbildung 3 dargestellten Differenzierung des Risikobegriffs geführt.

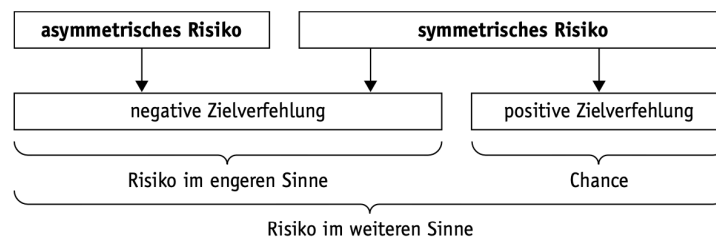


Abbildung 3: Zusammenhang von Symmetrie und Risikoverständnis
Quelle: Kremers (2002, S. 38)

Ein symmetrisches Risikoverständnis berücksichtigt gleichermaßen negative und positive Abweichungen von einem erwarteten (Ziel-)Wert und entspricht dem „Risiko im weiteren Sinne“. Das „Risiko im engeren Sinne“ dagegen berücksichtigt nur negative Abweichungen vom erwarteten (Ziel-)Wert und entspricht damit einem asymmetrischen Risikoverständnis (Kremers, 2002, S. 38).

Eine umfangreiche Übersicht verschiedener Risikobegriffe und – maße sowie deren Beschreibung findet man wie in Abbildung 4 dargestellt bei Bruns & Meyer-Bulleridek (2013, S. 9).

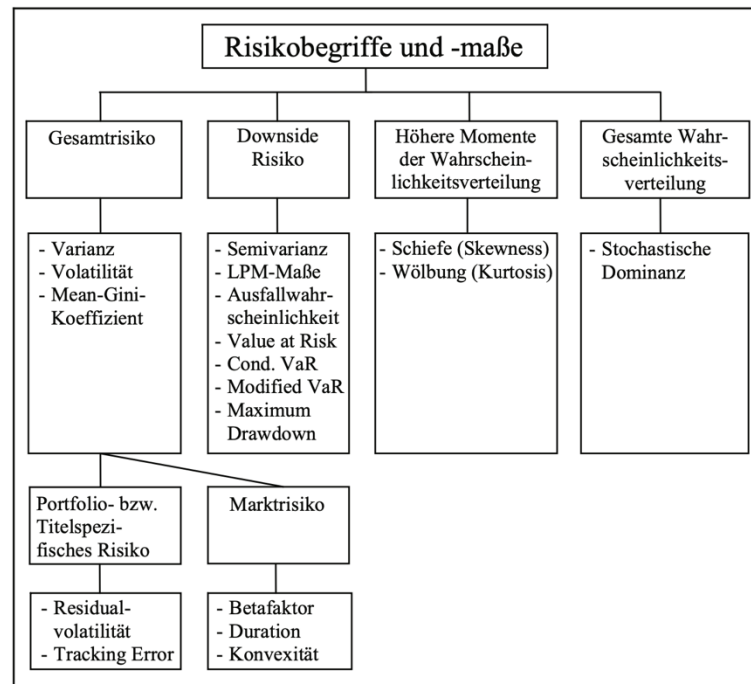


Abbildung 4: Alternative Risikobegriffe und -maße
 Quelle: Bruns & Meyer-Bullerdiek (2013, S. 9)

Der überwiegende Teil der im Portfoliomanagement verwendeten Risikomaße entspringt einer quantitativen Natur. Durch die Quantifizierung der Risiken werden diese den Portfolio- und Risikomodellen in Form von Eingangsgrößen zugänglich gemacht und stellen somit einen integralen Bestandteil der Portfoliooptimierung dar (Ernst & Schurer, 2015, S. 85). In der Investmentpraxis gibt es jedoch kein Risikomaß, das allgemein als richtiges Risikomaß akzeptiert wird (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 176).

Eine sehr wichtige statistische Eigenschaft der Varianz begründet den Grundgedanken der Portfoliotheorie. Es kommt zu einer Reduktion der Varianz, wenn unterschiedliche Wertpapiere miteinander kombiniert werden, deren erwartete Renditen nicht vollständig positiv korreliert sind (Ernst & Schurer, 2015, S. 278). Markowitz Argumentation folgend lässt sich die Varianz eines Portfolios, das eine beliebige Anzahl an Wertpapieren enthält, berechnen als (Markowitz, 1952):

$$\sigma_P^2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_j \cdot x_k \cdot \sigma_j \cdot \sigma_k \cdot \rho_{j,k}$$

bzw.:

$$\sigma_P^2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_j \cdot x_k \cdot \sigma_{ij}$$

da gilt

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

Man spricht vom Diversifikationseffekt, wenn das Portfoliorisiko geringer ist als die Summe der mit ihren Portfolioanteilen gewichteten Risiken der Einzelwerte. Das Ausmaß der möglichen Risikoreduzierung durch Diversifizierung hängt nicht nur von den Einzelrisiken der Wertpapiere ab, sondern vielmehr von deren Wechselwirkungen untereinander (Maier, 2007, S. 217). Die Rückflüsse einzelner Wertpapiere steigen und fallen tendenziell gemeinsam, jedoch nicht zu 100%. Nicht alle Wertpapierrückflüsse korrelieren gleich stark (Markowitz, 2008, S. 135). Ein Maß für die gegenseitige Abhängigkeit der Renditen ist der Korrelationskoeffizient. Dieser kann Werte von -1 bis +1 annehmen. Ein Korrelationseffizient von +1 drückt aus, dass die Renditen zu 100% korrelieren, sich also vollkommen gleichgerichtet verhalten. Eine perfekt gegensätzliche Entwicklung der Renditen wird mit einem Korrelationskoeffizienten von -1 beschrieben. Existiert gar kein systematischer Zusammenhang in der Renditeentwicklung verschiedener Wertpapiere kann der Korrelationskoeffizient einen Wert von Null annehmen. Der Diversifikationseffekt ist umso größer, je geringer die Korrelation der unterschiedlichen Wertpapiere in einem Portfolio ausfällt (Ernst & Schurer, 2015, S. 215). Die Risikoparameter, also die Volatilität und die Korrelationen der Assets untereinander, werden in der Regel mithilfe historischer Daten geschätzt (Garz et al., 2006, S. 205).

Es herrscht Einigkeit darüber, dass für die Prognose des Risikos die Vergangenheit ein besserer Indikator zu sein scheint als für die Prognose von Renditen. Risikomaße haben sich tendenziell als stabiler erwiesen als Renditekennzahlen argumentieren Bruns & Meyer-Bullerdiel (2013, S. 8). Sie gehen davon aus, dass quantitative Risikokennzahlen stets auf der Basis von Vergangenheitsrealisationen gebildet werden und überwiegend auf Kurzzeitreihen basieren. Auch Specht & Gohout (2009, S. 96) behaupten es sei unumstritten, dass die Risiko-Prognose auf Basis historischer Daten weniger problematisch sei als die Ertragsprognose.

Ein Problem bei der Schätzung von Risikoparametern sei es jedoch, dass sich diese Schätzungen als sehr zeitraumabhängig erwiesen haben. Um die Veränderung der Volatilität im Zeitablauf zu erfassen, arbeitet man bei Volatilitätsprognosen in der Regel mit dynamischen Modellen. Dynamisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich auch die Prognosewerte im Zeitablauf anpassen. Als zeitabhängige Modellierungsverfahren sind die gleitende Durchschnittsbildung (ARMA) und die exponentielle Glättung zu nennen (Garz et al., 2006, S. 205; Specht & Gohout, 2009, S. 99). Die Kritik an diesen „einfacheren“ Modellen führt zu einer zunehmenden Beliebtheit sogenannter ARCH- und GARCH-Ansätzen, die eine feinere Prognose erlauben (Specht & Gohout, 2009, S. 100; Bruns & Meyer-Bullerdiel, 2013, S. 14 f.; Garz et al., 2006, S. 207; Spremann, 2008, S. 552).

2.1.3 Portfolioauswahl und -optimierung

Die vollständige Beschreibung des Entscheidungsproblems der Portfoliotheorie besteht in der Angabe der erwarteten Renditen und Varianzen beziehungsweise Standardabweichungen der

für eine Investitionen in Betracht kommenden Wertpapiere (Ernst & Schurer, 2015, S. 207). Die Bildung eines optimalen Portfolios erfordert neben der erfolgreichen Selektion aus einem globalen Anlageuniversum vor allem die zielführende Ermittlung der Anlagetitel-Gewichtungen (Ernst & Schurer, 2015, S. 24). Da es sich beim theoretischen Rahmenwerk der Portfolioselektion Theorie um ein ökonomisches Modell handelt, liegen den nachfolgenden Betrachtungen einige wichtige Annahmen zu Grunde:

- Normalverteilung der Renditen (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 84; Garz et al., 2006, S. 30)
- Beliebige Teilbarkeit der Wertpapiere (Garz et al., 2006, S. 30; Ernst & Schurer, 2015, S. 209; Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 84)
- Ein-Perioden-Betrachtung (Garz et al., 2006, S. 30; Ernst & Schurer, 2015, S. 209)
- Investoren verhalten sich rational und risikoscheu (Garz et al., 2006, S. 31; Ernst & Schurer, 2015, S. 209; Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 84)
- keine Transaktionskosten (Ernst & Schurer, 2015, S. 209; Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 84)

Ein Vorteil der vollständigen Beschreibbarkeit mit nur zwei Parametern ist die grafische Darstellbarkeit in einem zweidimensionalen Koordinatensystem, dem so genannten μ/σ - bzw. Rendite-Risiko-Diagramm (Garz et al., 2006, S. 31). Auf der Abszisse wird das Risiko abgetragen, die Ordinate beschreibt die Rendite (Spremann, 2008, S. 177). Für ein Portfolio bestehend aus zwei Wertpapieren ist die Rendite definiert als: (Spremann, 2008, S. 175)

$$\mu_P = x \cdot \mu_A + (1 - x) \cdot \mu_B$$

Für das Portfoliorisiko gilt:

$$\sigma_P = \sqrt{x^2 \cdot \sigma_A^2 + (1 - x)^2 \cdot \sigma_B^2 + 2 \cdot x \cdot (1 - x) \cdot \sigma_A \cdot \sigma_B \cdot \rho_{A,B}}$$

Überträgt man diese Daten in ein Rendite-Risiko-Diagramm, beschreibt die Form der Hyperbel den Diversifikationseffekt wie Abbildung 5 zeigt.

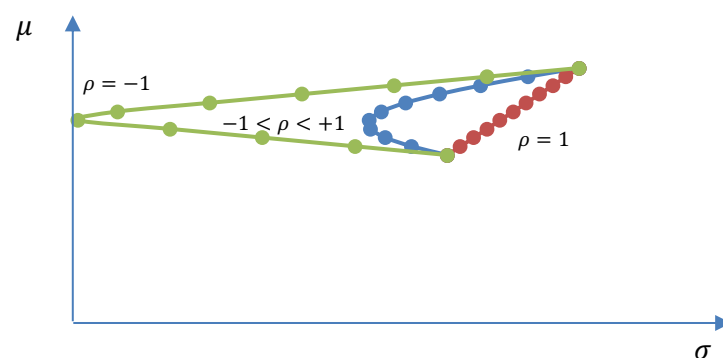


Abbildung 5: Möglichkeitenkurven in Abhängigkeit vom Korrelationskoeffizienten
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Garz et al. (2006, S. 36)

Bei einem Korrelationskoeffizienten von $\rho_{A,B} = 1$ steigen und fallen die Rückflüsse der beiden Wertpapiere A und B im Verhältnis genau gleich. Sie sind zu 100% korreliert und es ist kein Diversifikationseffekt zu erzielen. Geht man davon aus, dass der Korrelationskoeffizient der Wertpapiere A und B $\rho_{A,B} = 0$ beträgt, es also keinen systematischen Zusammenhang zwischen den Renditen der Wertpapiere A und B gibt, kann das Risiko durch Portfoliobildung reduziert werden. Das größte Diversifikationspotenzial weisen Wertpapiere auf, die perfekt negativ korreliert sind, also einen Korrelationskoeffizienten von $\rho_{A,B} = -1$ aufweisen (Garz et al., 2006, S. 36 f.; Ernst & Schurer, 2015, S. 218 f.).

Wenn man also durch die geschickte Kombination verschiedener Wertpapiere das Rendite-Risiko-Profil eines Portfolios beeinflussen kann, stellt sich die Frage nach dem optimalen Portfolio. Allgemein hat Markowitz (1952) ein Portfolio A eines risikoaversen Investors als effizient bezeichnet, wenn es zu diesem Portfolio keine Alternative gibt, die

- bei gleichem Risiko einen höheren Ertrag,
- bei gleichem Ertrag ein geringeres Risiko oder
- einen höheren Ertrag bei einem geringeren Risiko

erwarten lässt (Specht & Gohout, 2009, S. 21).

Betrachtet man im oben dargestellten Risk-Return-Diagramm das Beispiel, bei dem der Korrelationskoeffizient null ist, erkennt man, dass alle Portfolios auf dem unteren Ast der Hyperbel von Portfolios auf dem oberen Ast der Hyperbel dominiert werden. Portfolios auf dem oberen Ast der Hyperbel weisen bei gleichem Risiko höhere Renditen auf als Portfolios, die sich auf dem unteren Ast der Hyperbel befinden. Der obere und der untere Ast werden durch das Portfolio mit der geringsten Standardabweichung getrennt. Man spricht hierbei vom globalen Minimum-Varianz-Portfolio (MVP). Den oberen Ast nennt man Effizienzkurve. Das durch dieses Gewicht bestimmte Minimum-Varianz-Portfolio trennt die effizienten von den dominierten Portfolios, die aus A und B erzeugt werden (Spremann, 2008, S. 180).

Um das Minimum-Varianz-Portfolio im Zwei-Wertpapier-Fall zu bestimmen, wird die Portfoliovarianz nach x , dem Gewicht der Einzelanlage A, differenziert und die erste Ableitung gleich null gesetzt (Spremann, 2008, S. 180):

$$x_{MVP} = \frac{\sigma_B^2 - \sigma_A \cdot \sigma_B \cdot \rho_{A,B}}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2 - 2 \cdot \sigma_A \cdot \sigma_B \cdot \rho_{A,B}}$$

Erweitert man die Möglichkeit der Anlage auf mehr als zwei Wertpapiere, deren erwartete Renditen, Varianzen und Kovarianzen bekannt sind, lassen sich diese ebenfalls gemäß Abbildung 6 im Rendite-Risiko-Diagramm darstellen.

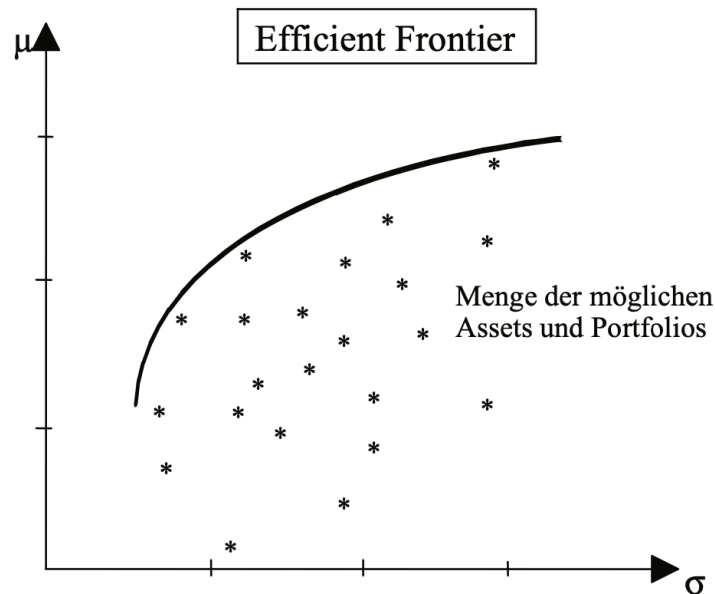


Abbildung 6: Effizienzlinie

Quelle: Bruns & Meyer-Bullerdiek (2013, S. 84)

Die Grenzportfolios sind dadurch gekennzeichnet, dass sie zu einer gegebenen erwarteten Rendite die geringste Varianz aufweisen. Sie lassen sich ermitteln, indem die erwartete Rendite der Portfolios fixiert und ausschließlich die Varianz minimiert wird (Ernst & Schurer, 2015, S. 272 ff.):

$$\sigma_P^2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_j \cdot x_k \cdot \sigma_{ij} \rightarrow \min!$$

unter der Nebenbedingung

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

$$x_i \geq 0 \text{ für alle } i = 1, \dots, n$$

Die Nebenbedingung sorgt für die vollständige Investition des zur Verfügung stehenden Kapitals. Das globale Minimum-Varianz-Portfolio, trennt wie im Zweianlagenfall die Menge der Grenzportfolios in einen effizienten und einen ineffizienten Teil (Garz et al., 2006, S. 44). Effiziente Portfolios offerieren demnach ein optimales Rendite-Risiko-Austauschverhältnis. Bei der Auswahl werden daher nur effiziente Portfolios in das Entscheidungskalkül eines rationalen Investors einfließen. Alle sonstigen Portfolios sind für ihn von vornherein uninteressant. (Garz et al., 2006, S. 45; Ernst & Schurer, 2015, S. 208).

Kleeberg (1993) hat in den Jahren 1986-1992 Minimumvarianzportfolios auf Basis der DAX-Titel untersucht. Im Ergebnis erzielten die untersuchten Minimumvarianzportfolios bei einer

um 6,07% geringeren Standardabweichung pro Jahr eine um 8,99-Prozentpunkte höhere Rendite als der DAX (Staehele, 2004).

Sharpe, Tobin und Lintner haben aufbauend auf der Arbeit von Markowitz das Capital Asset Pricing Model (CAPM) entwickelt und das Portfolio-Selection-Modell um die Kapitalmarktklinie ergänzt. Bei der Auswahl eines effizienten Portfolios wird zusätzlich die Möglichkeit der risikolosen Anlage berücksichtigt. Wie Abbildung 7 zeigt, stellt die Kapitalmarktklinie die Verbindungslinie zwischen der risikolosen Anlage (Varianz gleich null) und dem Tangentialportfolio dar. Die Kapitalmarktklinie stellt die „neue“ Effizienzkurve unter Berücksichtigung der risikolosen Anlage dar. Das Tangentialportfolio wird auch Marktportfolio genannt, bei dem es sich um das bestmöglich diversifizierte Portfolio handelt. Es enthält sämtliche verfügbaren Anlagen und ist unabhängig von der Risiko-Rendite-Präferenz der Investoren. Im Capital Asset Pricing Model hat das Marktportfolio definitionsgemäß einen Betafaktor von eins und weist aufgrund der perfekten Diversifikation über sämtliche Anlagen nur noch systematisches Risiko auf. Beim Tangentialportfolio handelt es sich außerdem um das Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio (Ernst & Schurer, 2015, S. 233 ff.).

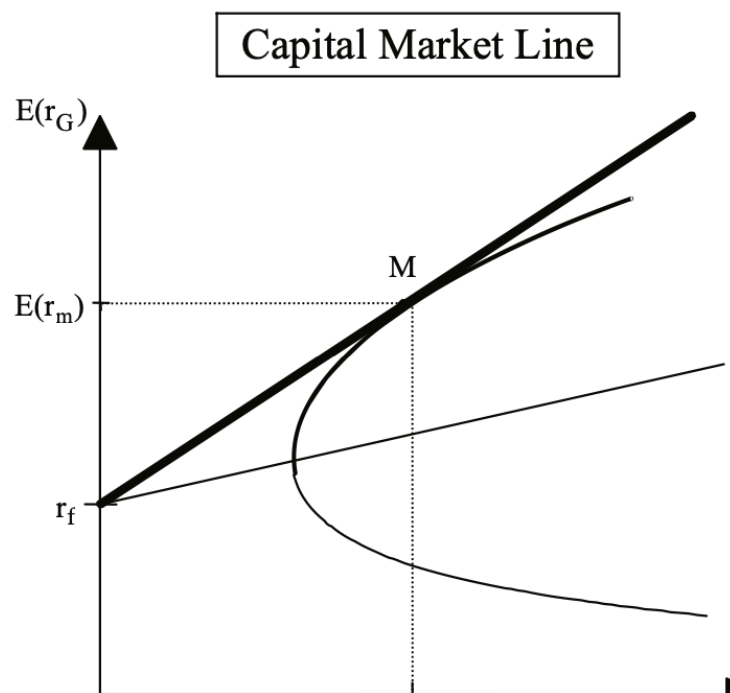


Abbildung 7: Kapitalmarktklinie
Quelle: Bruns & Meyer-Bullerdiek (2013, S. 86)

Die Umstrittenheit der Standardabweichung als Risikomaß hat eine Debatte um alternative Risikomaße wie den Value at Risk oder den Conditional Value at Risk hervorgerufen. Diese intuitiveren Downside Risikomaße finden in der Portfoliomanagementpraxis zunehmend Verbreitung (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 24). Internationale Banken sind sogar

verpflichtet, auf dem Value at Risk basierende Risikomanagementsysteme zu verwenden (Alexander, 2009).

Alexander (2009) beschreibt in seinem Beitrag „From Markowitz to modern risk management“ wie die Risikomaße Value at Risk (VaR) und Conditional Value at Risk (CVaR) eines Portfolios in den Mittelwert-Standardabweichung-Rahmen von Markowitz eingeordnet werden können. Abbildung 8 zeigt, dass das Minimum-VaR-Portfolio und das Minimum-CVaR-Portfolio auf der Mittelwert-Varianz-Effizienzkurve liegen. Das Minimumvarianzportfolio ist dagegen weder Mittelwert-VaR effizient noch Mittelwert-CVaR effizient. Das Minimum-VaR-Portfolio wiederum ist Mittelwert-CVaR effizient.

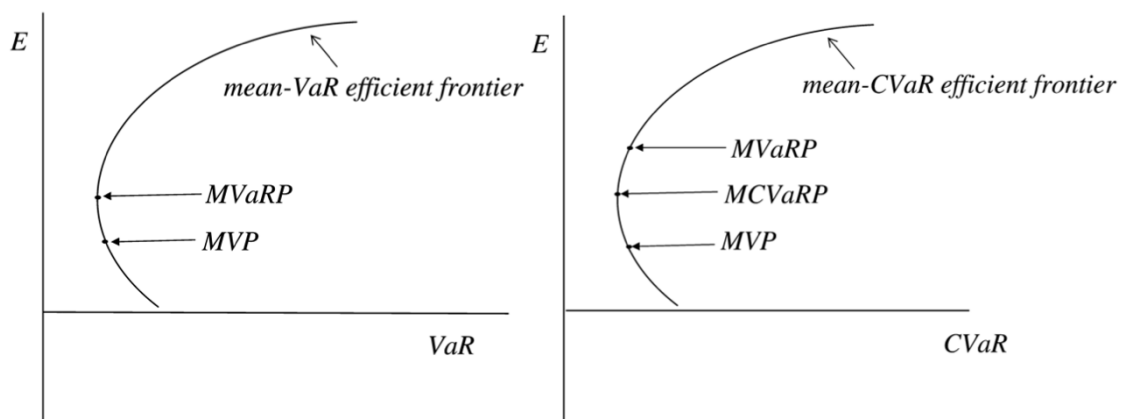


Abbildung 8: Mittelwert-VaR Effizienzkurve und Mittelwert-CVaR-Effizienzkurve
Quelle: Alexander (2009)

Alexander (2009) geht weiterhin auf die Bedeutung einer Value at Risk Grenze im Portfoliomanagement ein. Er zeigt, dass eine ungünstig gewählte Value at Risk Grenze dazu führt, dass nicht nur Portfolios mit einer sehr hohen Standardabweichung, sondern auch Portfolios mit einer sehr geringen Standardabweichung ausgeschlossen werden. Ein auf dem Value at Risk basierendes Risikomanagementsystem kann zu dem widersprüchlichen und unerwünschten Ergebnis führen, dass riskantere Portfolios gewählt werden müssen. Alexander (2009) zeigt, wie die Verwendung richtig gewählter CVaR-Grenzen die beschriebenen unerwünschten Ergebnisse verhindern kann.

2.1.4 Diversifikation im modernen Risikomanagement

Alexander (2009) beschreibt in seinem Beitrag im „The European Journal of Finance“ Markowitz nicht nur als den Begründer der modernen Portfoliotheorie, sondern auch als Begründer des modernen Risikomanagements. Er stützt seine Aussage damit, dass die Beiträge zur Portfoliotheorie von Markowitz den Ausgangspunkt dafür bilden, wie Risiken heute betrachtet und gemanagt werden. Nachdem die Grundlagen der Portfoliotheorie dargestellt wurden, wird im Folgenden Diversifikation in den Risikomanagementprozess eingeordnet und beschrieben in welchem Umfang das Risiko durch Diversifikation reduziert werden kann.

Unter Risikomanagement versteht Gleißner (2011, S. 11) das systematische Denken und Handeln im Umgang mit Risiken. Vanini (2012, S. 20) berücksichtigt verschiedene Merkmale, über die Einigkeit bei einschlägigen Autoren herrscht, und begründet damit folgende Definition:

„Risikomanagement (RM) umfasst alle organisatorischen Regelungen und Aktivitäten zur systematischen, regelmäßigen und unternehmensweiten Umsetzung des Risikomanagement-Prozesses (RM-Prozesses) sowie dessen Unterstützung durch geeignete Instrumente und Methoden mit den Zielen der langfristigen Existenzsicherung, der Eröffnung von Handlungsspielräumen, der Erreichung der geplanten Unternehmensziele und der Senkung der Risiko- und Kapitalkosten. Die Umsetzung des RM ist Aufgabe der Unternehmensführung.“

Wolke (2016, S. 5) sowie Wolf & Runzheimer (2003, S. 32) verstehen wie viele weitere Autoren Risikomanagement als einen dynamischen Prozess, der einer ständigen Wiederholung unterliegt und beschreiben diesen entsprechend Abbildung 9 anhand von vier Phasen.

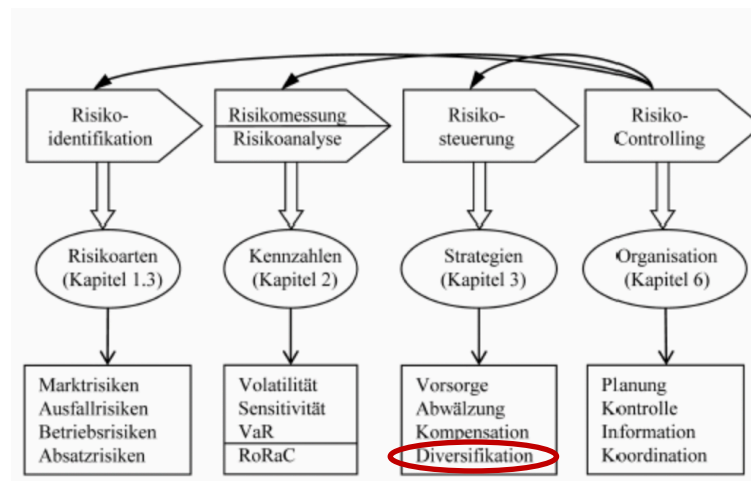


Abbildung 9: Risikomanagement-Prozess

Quelle: Wolke (2016, S. 5); Hervorhebung der „Diversifikation“ ergänzt

Der Risikomanagementprozess beginnt mit der möglichst vollständigen Identifikation aller relevanten Risiken. Für die Identifikation möglicher Risiken kommen unterschiedliche Instrumente, wie Checklisten, Fehlerbaum- oder Flow-Chart-Analysen im operativen Bereich zum Einsatz sowie Brainstorming, Brainwriting oder Szenariotechnik für strategische Fragestellungen (Wolf & Runzheimer, 2003, S. 44 ff.). Wolke (2016, S. 5) legt der Risikoidentifizierung eine Systematisierung der betriebswirtschaftlichen Risikoarten zugrunde.

In der zweiten Prozessphase werden Risiken hinsichtlich ihres Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit analysiert. Die Bewertung von Risiken kann sowohl in einer quantitativen Form als auch in einer qualitativen Form erfolgen (Wolke, 2016, S. 5; Sitt, 2003, S. 29 f.). Die quantitative Bewertung kann anhand der in Kapitel 2.1.2.2 beschriebenen Risikomaße erfolgen, während für die qualitative Bewertung Instrumente wie z.B. Scoring Modelle zur Verfügung stehen.

Die Diversifikation von Risiken ist eine von mehreren möglichen Strategien der Risikosteuerung. Neben der Diversifikation sind die Strategien der Vorsorge, der Abwälzung sowie der Kompensation zu nennen (Wolke, 2016, S. 6). Wolf & Runzheimer (2003, S. 89) unterscheiden fünf Stufen der Risikohandhabung: Vermeiden, vermindern, begrenzen, selbsttragen und versichern (siehe Abbildung 10).

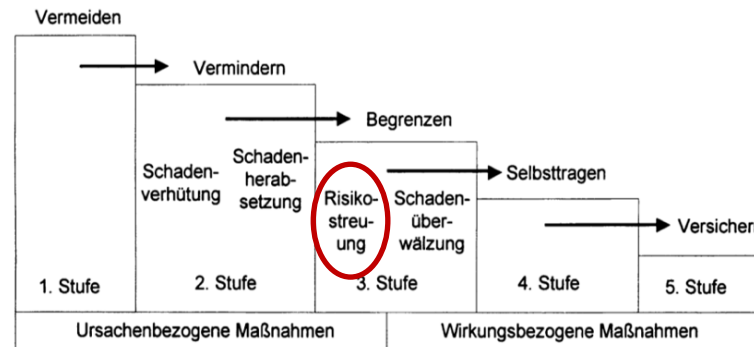


Abbildung 10: Formen der Risikohandhabung

Quelle: Wolf & Runzheimer (2003, S. 89); Hervorhebung der „Risikostreuung“ ergänzt

Die Risikobegrenzung beinhaltet dabei die Teilbereiche Risikostreuung basierend auf der von Markowitz entwickelten Portfoliotheorie sowie die Schadensüberwälzung. In Abgrenzung zur Diversifikation von Risiken wechselt bei der Schadenüberwälzung der Risikoträger, z.B. durch Factoring oder Leasing (Wolf & Runzheimer, 2003, S. 90).

Hauptaufgaben des Risikocontrollings sind das Risikoreporting und die Unterstützung der Unternehmensführung. Außerdem obliegt ihm die Methodenhoheit der Messverfahren des Risikomanagements sowie deren Organisation und Überwachung (Wolke, 2016, S. 6).

Um das Risikodiversifikationspotenzial eines Portfolios zu ermitteln, ist eine Unterteilung des Gesamtrisikos in die Komponenten systematisches und unsystematisches Risiko von entscheidender Relevanz (Ernst & Schurer, 2015, S. 214). Das systematische Risiko beschreibt allgemeine Marktrisiken, denen alle Wertpapiere eines Marktes unterliegen. Man spricht von kapitalmarktinhärenten Veränderungen, z.B. durch Konjunktur, Inflation oder Politik. Eine Verringerung des systematischen Risikos innerhalb einer Assetklasse ist durch Diversifikation grundsätzlich nicht möglich (Maier, 2007, S. 12). Man spricht daher in diesem Zusammenhang auch vom unvermeidbaren bzw. systematischen Risiko eines Portfolios. Im Umkehrschluss bezeichnet man das durch Diversifikation eliminierbare Risiko als unsystematisches Risiko (Garz et al., 2006, S. 43). Unsystematische Risiken beziehen sich auf die Einzelanlage selbst. Sie stehen nicht im Zusammenhang mit übergeordneten Ereignissen und werden nicht entsprechend am Markt vergütet. Diese titelspezifischen Risiken wie beispielsweise Bonitäts- oder Insolvenzrisiken sowie Vermarktungsrisiken sind schwer prognostizierbar, können jedoch durch geschickte Diversifikation minimiert werden. Mit „ausreichender“ Diversifikation lässt

sich das Risiko des Portfolios auf das systematische bzw. Marktrisiko reduzieren (Penny, 1982).

Ein Maß für das systematische Risiko ist der Betafaktor. Der Betafaktor misst die Beziehung zwischen der Überrendite der Einzelanlage und dem Marktportfolio und damit wie stark eine Einzelanlage auf die Einflussgröße „Markt“ reagiert.

Abbildung 11 verdeutlicht, dass neben der Korrelation zwischen den unterschiedlichen Wertpapieren auch die Anzahl der Wertpapiere innerhalb eines Portfolios einen unmittelbaren Einfluss auf den Diversifikationseffekt des Portfoliorisikos besitzt (Ernst & Schurer, 2015, S. 214). Garz et al. (2006, S. 43) argumentieren, dass bereits ab einer Anzahl von ca. 15 Wertpapieren der Anteil der Varianzen an der Portfolio-Varianz relativ klein wird, sodass ein ausreichender Diversifikationsgrad erzielt werden kann. Götte (2012, S. 88) beschreibt, dass 20 Aktien ausreichen, um das unsystematische Risiko zu 90% zu eliminieren.

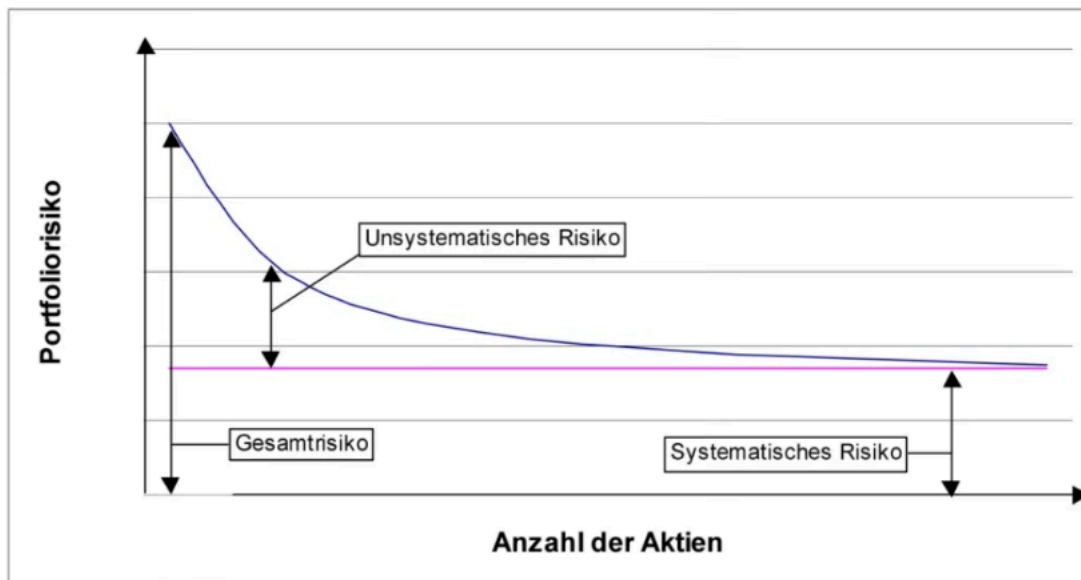


Abbildung 11: Portfoliorisiko in Abhängigkeit der Aktienanzahl
Quelle: Götte (2012, S. 89)

Die Portfoliovarianz lässt sich in Varianz- und Kovarianzrisiken aufteilen. Mit wachsender Portfoliogröße nimmt die Bedeutung der Kovarianzrisiken überproportional zu. Der Anteil der Varianzrisiken am Gesamtrisiko des Portfolios wird bei sehr großem N vernachlässigbar klein – man spricht von vollständiger Diversifikation. Übrig bleiben lediglich die Kovarianzrisiken der Wertpapiere im Portfolio, bzw. das „unvermeidbare“ systematische Risiko (Garz et al., 2006, S. 42 f.).

Die Ergebnisse von empirischen Arbeiten, welche die Anzahl von Wertpapieren optimaler Portfolios untersuchen, kommen (im Zeitverlauf) zu unterschiedlichen Ergebnissen. Evans & Archer (1968) beschreiben, dass die optimale Anzahl an Wertpapieren zwischen acht und zehn Titeln liegt. Darauf aufbauende Untersuchungen kamen zu dem Ergebnis, dass 30-40

(Statman, 1987), mehr als 50 (Campbell et al., 2001) oder 300 Wertpapiere (Statman, 2004) zur optimalen Diversifikation notwendig sind.

2.1.5 Anwendungsbeispiele der Portfoliotheorie im Bereich der erneuerbaren Energien

Das Hauptanwendungsgebiet der Portfoliotheorie ist das Management von Wertpapieren, da diese die restriktiven Annahmen des Modells am ehesten erfüllen (Schnelle & Rehkugler, 2009, S. 208). Die Popularität des Modells hat jedoch dazu geführt, dass es zunehmend auch für andere Assetklassen als Wertpapiere Anwendung gefunden hat. Beinhofer (2009) zum Beispiel hat die Portfoliotheorie in der Forstwirtschaft angewandt, Penny (1982) sowie Kangari und Riggs (1988) für Investitionen in Immobilien und Kobzar (2006) im Ackerbau. Insbesondere für Investitionen in Immobilien hat sich die Anwendung der Portfoliotheorie seit den 80er Jahren etabliert (Schnelle & Rehkugler, 2009, S. 208). Wie bei Immobilien handelt es sich auch bei erneuerbaren Energieanlagen wie Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen ebenfalls um Sachwertinvestitionen, sodass die Portfoliotheorie auch für diese Assetklasse Anwendung gefunden hat, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Dunlop (2004)

Dunlop (2004) begründet seine Arbeit damit, dass der Windmarkt wächst und an Bedeutung für institutionelle Investoren gewinnt. Er wendet die moderne Portfoliotheorie und das Capital Asset Pricing Modell für Investitionen in Windparks an. Er bearbeitet die Fragen ob die Modelle auf den Markt für Windparks angepasst werden können und wieviel des Produktionsrisiko durch Portfoliobildung wegdiversifiziert werden kann. Grundlage seiner Analyse bilden quartalsweise Produktionsdaten von Windparks in der EU und den USA im Zeitraum von Juli 1999 bis Juni 2001 (acht Datenpunkte). Den Index, um ein Marktrisiko zu ermitteln, bilden die 22 Windparks seiner Stichprobe, die entsprechend ihrer installierten Leistung gewichtet sind. Dunlop ermittelt nicht die Korrelationen der Windparks untereinander, sondern die Korrelationen zwischen dem Index und den einzelnen Windparks. So lassen sich die Höhe des Marktrisikos, welches nicht wegdiversifiziert werden kann und die Betafaktoren der Windparks ermitteln (siehe Abbildung 12). Die Betafaktoren der Windparks liegen zwischen 0,0 und 1,6 bei einem Mittelwert von 0,9. Das systematische bzw. nicht diversifizierbare Risiko der Windparks liegt zwischen 0,01 und 0,42, was einem Anteil zwischen 2,6% und 92,3% am Gesamtrisiko entspricht. Der Mittelwert liegt bei 28,3%.

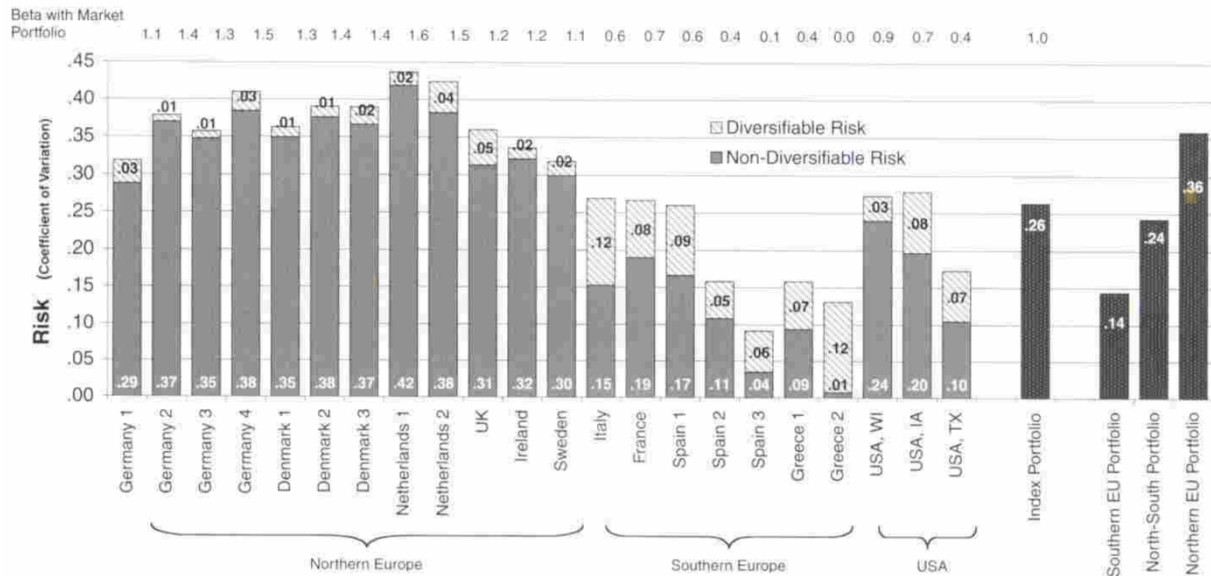


Abbildung 12: Das diversifizierbare Risiko von Windparks

Quelle: Dunlop (2004)

Darüber hinaus vergleicht er bei drei Portfolios mit je zehn gleichgewichteten Windparks die durchschnittliche Schwankung der Einzelanlagen mit der Schwankung des Portfolios und quantifiziert so den Portfolioeffekt. Die so ermittelte Risikoreduktion liegt bei 4%, 16% und 30%. Dunlop schlussfolgert, dass das Capital Asset Pricing Model für Investitionen in Windparks angewandt werden kann und der Betafaktor ein geeignetes Maß für das Produktionsrisiko darstellt.

Borchert und Schemm (2007)

Borchert und Schemm (2007) analysieren in ihrem Beitrag das Verhalten in technische Investitionen und untersuchen den Portfoliodiversifikationsgrad. Der fiktive Anlageraum ergibt sich aus zwei verschiedenen Windkrafttechnologien (Onshore und Offshore) und verschiedenen Standorten. Der Erwartungswert der Rendite wird auf Basis der Einspeiseleistung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit, der EEG-Vergütung bzw. des EEX-Spotpreises und den jährlichen Vollkosten aus dem Betrieb der Anlagen ermittelt. Die Datengrundlage bilden die stündlichen Windgeschwindigkeiten an 14 Messpunkten in den Niederlanden über sieben Jahre, die zur Approximation der Norddeutschen Region herangezogen wurden. Die erwarteten Windgeschwindigkeiten werden für jeden Standort mit einem ARMA-GARCH-Modell beschrieben, sodass unter Berücksichtigung der Leistungskennlinie einer spezifischen Windenergieanlage die stündliche Leistungsabgabe (in % der Nennleistung der Windenergieanlage) im Jahresverlauf angegeben werden kann. Für jeden Zeitschritt wird der EEX-Spotpreis durch das Gleichsetzen der zuvor modellierten Angebots- und Nachfragefunktion abgeleitet. Kostenseitig werden eine jährliche Annuität der Anfangsinvestition mit einem kalkulatorischen Zinssatz (WACC 7%) sowie jährliche Betriebskosten in Prozent der Investition berücksichtigt. Für die Stochastik der

Gesamtkosten wird eine Exponentialverteilung unterstellt. Neben dem Erwartungswert der Portfoliorendite fließt der Conditional Value at Risk, bezogen auf ein Konfidenzniveau von 0,95, als Risikomaß in die Optimierung ein. Im Ergebnis wurden im derzeitigen Vergütungsregime des EEG und bei den vorliegenden Daten geringe Diversifikationseffekte vorgefunden. Borchert und Schremm konnten mit dem Ergebnis der Portfoliooptimierung zeigen, dass Offshorestandorte bei den derzeitigen Vergütungssätzen die geforderte Kapitalverzinsung nicht erwirtschaften können. Zudem werden keine Offshore-Standorte entlang der Effizienzlinie in Portfolios gehalten, da ihre Rendite-Risiko-Parameter relativ zu denen der Investments an küstennahen Standorten inferior sind und eine Diversifikation diesen Nachteil in der Portfoliozusammenstellung nicht ausgleicht. Die im Rahmen der Novelle des (damaligen) EEG diskutierte Vergütungsveränderung, ist dazu geeignet, sowohl die Investitionstätigkeit im Offshorebereich zu aktivieren als auch durch niedrigere Vergütungssätze im Onshorebereich Investoren zur Diversifikation von Risiken anzuregen.

Borchert und Schemm haben den Einfluss der Vergütungssätze auf das Investitionsverhalten untersucht und zwei Szenarien verglichen. Die der Optimierung zugrundeliegenden Korrelationen bzw. Kovarianzen wurden nicht beschrieben. Da lediglich geringe Diversifikationseffekte vorgefunden wurden, ist von positiven Korrelationen auszugehen. Auch das Risikodiversifikationspotenzial wurde nicht explizit quantifiziert. Die Abbildung 13 zeigt jedoch, dass bei beiden Vergütungs-Szenarien der Conditional Value at Risk aller Einzelanlagen negativ ist. Die Portfolios auf den Effizienzlinien dagegen erreichen einen Conditional Value at Risk von bis zu 6,8% bzw. 7,7%.

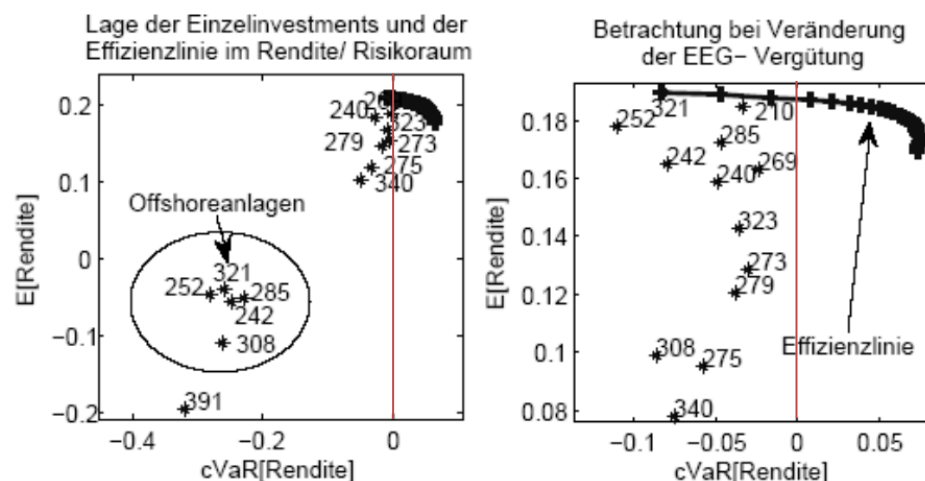


Abbildung 13: Ergebnisse der Portfoliooptimierungsrechnungen
Quelle: Borchert & Schemm (2007); ergänzt um die Linien bei null

Borchert und Schemm führen den größten Anteil der Risikoreduktion auf die Diversifikation der Investitions- und Betriebsrisiken zurück. Die Diversifikation der Mengenvariabilität wirke

sich nur mit geringem Maße auf die Verbesserung des Risikomaßes aus. Das Einzelrisiko sei maßgeblich von Rückflüssen durch Einspeise- und Preisstochastik beeinflusst und könne aufgrund der regionalen Auflösung nur begrenzt diversifiziert werden.

Wiese et al. (2008)

Ausgangspunkt der Arbeit von Wiese et al. (2008) ist die Tatsache, dass Investmentfonds immer häufiger eine ganze Reihe einzelner Projekte mit unterschiedlichen Technologien und Ressourcen finanzieren. Neben der Betrachtung der technischen, rechtlichen, umweltrelevanten, finanziellen und sonstigen Risiken von Einzelprojekten gewinne die Frage nach dem Portfolioeffekt im Rahmen von Due Diligences an Bedeutung. Daher haben Wiese et al. ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem es möglich ist, das Risiko von Portfolios aus erneuerbaren Energieprojekten zu analysieren. Im Modell werden die folgenden stromerzeugenden, netzgekoppelten Technologien betrachtet, da diese für Banken, Fondsgesellschaften und Energieversorgungsunternehmen von signifikantem Interesse sind:

- Windparks
- Photovoltaikanlagen
- Solarthermische Kraftwerke
- Biomassekraftwerke und Biomasseheizkraftwerke
- Biogasanlagen mit und ohne Wärmeauskopplung
- Wasserkraftwerke und
- Geothermiekraftwerke.

Mit dem Modell lassen sich für beliebige Portfoliokombinationen Energieertrag und Einkommensprognosen (EBITDA) berechnen, dabei werden acht verschiedene Risikokategorien und 30 Einzelrisiken berücksichtigt. Die projektspezifischen Modellparameter wie z.B. Technologie, Standort, Leistung und Kosten sowie die Risiken der Einzelprojekte und die Korrelationen untereinander müssen vor Simulationsbeginn eingegeben werden.

Im Rahmen der Arbeit von Wiese et al. werden beispielhaft drei Portfolios und je unterschiedliche Szenarien bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten (P50, P75 und P90) berücksichtigt:

- Portfolio aus zehn Windparks
- Portfolio aus zehn Photovoltaik-Anlagen
- Portfolio aus zehn Windparks und zehn Photovoltaik-Anlagen

Tabelle 1 zeigt, dass bei Verwendung des P50-Ertrags in keinem Fall ein Portfolioeffekt zu erkennen ist. Bei P75 und P90 ist der Effekt bei dem Portfolio das ausschließlich Windkraftanlagen enthält am größten. Der Portfolioeffekt beim Portfolio das ausschließlich Photovoltaik-Anlagen enthält ist sehr gering. Obwohl man erwarten könnte, dass die Kombination verschiedener Assetklassen den Portfolioeffekt verstärkt, ist zu erkennen, dass der Portfolioeffekt beim

Wind-Photovoltaik-Portfolio geringer ausfällt als bei dem Portfolio welches ausschließlich Windkraftanlagen enthält.

Tabelle 1: Portfolioeffekt der EBITDA-Prognose

		P50	P75	P75/P50	P90	P90/P50
EBITDA-Portfolioanalyse						
Wind-Portfolio						
kein Portfolioansatz	Mio.€/a	50	45	90,0%	41	82,0%
Portfolioansatz	Mio.€/a	50	47	94,0%	44	88,0%
Portfolioeffekt	%	0,0	4,4		7,3	
PV-Portfolio						
kein Portfolioansatz	Mio.€/a	46	43	93,5%	40	86,9%
Portfolioansatz	Mio.€/a	46	43	94,2%	41	88,2%
Portfolioeffekt	%	0,0	0,7		1,5	
Wind-PV-Portfolio						
kein Portfolioansatz	Mio.€/a	96	88	91,7%	81	84,4%
Portfolioansatz	Mio.€/a	96	91	94,8%	87	90,4%
Portfolioeffekt	%	0,0	3,4		7,1	

Quelle: Wiese et al. (2008)

In der hier zitierten Veröffentlichung von Wiese et. al. wird nicht beschrieben, wie die Einzelanlagen untereinander korrelieren bzw. welche Korrelationskoeffizienten den Ergebnissen zugrunde liegen. Bühler, einer der Autoren, dessen Arbeit in der Veröffentlichung zitiert wird, beschreibt, dass für die Korrelationskoeffizienten vor Simulationsbeginn anhand einer externen Korrelationsanalyse bestimmt werden müssen. Bei den vorliegenden Analyseergebnissen wurde für jedes Modellrisiko eine Korrelationsanalyse durchgeführt, wobei die Korrelationskoeffizienten nicht veröffentlicht sind. Eine Unterscheidung zwischen systematischem und unsystematischem Risiko findet nicht statt.

Riessen (2010)

Riessen (2010) untersucht in seiner Arbeit neben den Einzelrisiken einer Biogasanlageninvestition und dem investitionsspezifischen Gesamtrisiko, die Risikowirkung einer Biogasanlageninvestition auf landwirtschaftliche Portfolios. Der Betrachtung des Risikos einer Biogasanlageninvestition auf den verschiedenen Ebenen liegt in seiner Arbeit immer der gleiche Anlagentyp zugrunde (500kW NaWaRo-Anlage mit Wärmekonzept, Substrate: Maissilage, Weizen, Rindergülle). Die Analyse der Einzelrisiken basiert auf einem vollständigen Finanzplan der Modellbiogasanlage für die Jahre 2007-2027. Eine Sensitivitätsanalyse berücksichtigt die Unsicherheit bei der Investitionsentscheidung, indem „Outputänderungen bei gegebener Inputänderung“ sowie „kritische Werte“ ermittelt werden. Die Analyseergebnisse der Einzelrisiken bilden die Grundlage für die Analyse des investitionsspezifischen Risikos. Da keine historischen Daten zur Ermittlung der Inputverteilung vorliegen, kommt in seiner Arbeit die Monte-Carlo-Simulation zum Einsatz. 15 Inputgrößen der Investitionsrechnung, die maßgeblich das Risikoprofil einer Biogasanlageninvestition bestimmen, fließen als exogene Variablen in das Modell ein. Riessen argumentiert, dass bei den Inputvariablen Normalverteilung angenommen werden kann und sich diese durch die Nennung des Erwartungswertes und der

Standardabweichung hinreichend genau beschreiben lassen. Zielgröße der Monte-Carlo-Simulation (10.000 Iterationen) sind (analog zum vollständigen Finanzplan) der Investitionsendwert und die Eigenkapitalverzinsung. Der ermittelte Erwartungswert der Eigenkapitalrendite der Modellanlageninvestition beträgt 12,36% mit einer Standardabweichung von 7,98%. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen bilden wiederum die Grundlage für die Analyse der Risikowirkung auf landwirtschaftliche Portfolios. Neben der Biogasanlageninvestition werden die Eigenkapitalrenditen und deren Standardabweichung von fünf unterschiedlichen landwirtschaftlichen Betriebszweigen (Getreidebau, Milcherzeugung, Rindermast, Schweinezucht, Schweinemast) im Rahmen der Portfolioanalyse berücksichtigt. Die Datengrundlage dafür bilden historische Zeitreihen der Statistik des Testbetriebsnetz der Jahre 1995/1996 bis 2006/2007. Auf der Basis können außerdem die Korrelationen der einzelnen Betriebszweige untereinander berechnet werden, während die Korrelation der einzelnen Betriebszweige mit einer Biogasanlageninvestition durch die Befragung von drei Experten ermittelt wird. Tabelle 2 zeigt, dass die Kombination einer Biogasanlageninvestition mit den Betriebszweigen Rindermast, Milcherzeugung und Getreidebau zu einer geringen Risikodiversifikation führt. In Kombination mit den Betriebszweigen Schweinezucht und Schweinemast ist eine Biogasanlage jedoch in der Lage, das Risikoniveau um bis zu 17,45% bzw. 21,66% gegenüber dem Ausgangsniveau zu verringern.

Tabelle 2: Absolute und relative Änderung des Risikoniveaus

Betriebszweige	σ Betriebszweig	σ MVP mit Biogas	absolute Differenz	relative Risikoänderung
Rindermast	0,705 %	0,677 %	-0,029	-4,069 %
Milcherzeugung	0,974 %	0,925 %	-0,049	-4,999 %
Getreidebau	0,815 %	0,751 %	-0,064	-7,854 %
Schweinezucht	4,630 %	3,822 %	-0,808	-17,448 %
Schweinemast	5,501 %	4,310 %	-1,191	-21,659 %

Quelle: Riessen (2010, S. 184)

Chaves-Schwintek (2013)

Aufbauend auf den Erkenntnissen von Dunlop (2004) analysiert Chaves-Schwintek (2013) die Beschränkungen der für Finanzanlagen entwickelten Portfoliotheorie im Zusammenhang mit Sachanlagen wie Windparks. Darüber hinaus behandelt sie die Frage, inwieweit die Bedingungen für Investitionen in Windparks durch Diversifizierung der Risiken verbessert werden können. Grundlage der zwei Fallstudien ist ein von ihr entwickeltes Finanzmodell, das es ermöglicht den Diversifizierungseffekt zu quantifizieren. In der ersten Fallstudie untersucht sie den Diversifikationseffekt bei einer Investition in neun Windparks an unterschiedlichen Standorten in Deutschland. In der zweiten Fallstudie untersucht sie den Diversifikationseffekt bei einer Investition in neun Windparks weltweit.

Für die Windparks in Deutschland unterscheidet Chaves-Schwintec bei den Risiken, die den Ertrag beeinflussen:

- das Windaufkommen gemäß den Daten des BDB Wind Index und
- die technische Verfügbarkeit der Windenergieanlagen.

Für beide Risikofaktoren werden je die Korrelationen der Windparks auf Basis von Monatsdaten untereinander ermittelt. Die Korrelationskoeffizienten des Windaufkommens der Windparks in Deutschland liegen zwischen 0,77 und 1,00. Wobei die perfekten Korrelationen dadurch zustandekommen, dass sich mehrere Windparks in den gleichen BDB Index Regionen befinden. Berücksichtigt man nur Windparks in unterschiedlichen BDB Index Regionen, liegen die Korrelationskoeffizienten zwischen 0,77 und 0,98. Die ermittelten Korrelationen der technischen Verfügbarkeit der Windparks in Deutschland sind geringer und liegen zwischen 0,00 und 0,76.

Bei den Windparks weltweit berücksichtigt Chaves-Schwintec (2013) lediglich Daten von Windgutachten, da die Projekte noch nicht entwickelt und die Windparks noch nicht gebaut sind. Die Korrelationen der Winddaten liegen zwischen 0,001 und 0,753. Im Ergebnis konnte in der ersten Case-Study, bei der sich alle Windparks in Deutschland befinden, eine Risikoreduktion von 7,6% auf 6,6% durch Portfoliobildung realisiert werden. Das entspricht einer relativen Risikoänderung von -13%. Bei der zweiten Case-Study, die Standorte weltweit berücksichtigt, hat Chaves-Schwintec eine Risikoreduktion von 13,1% auf 11,4% ermittelt. Die relative Risikoänderung beträgt demnach ebenfalls -13%.

2.2 Die Biogasanlage als Sachwertinvestition

2.2.1 Entwicklung des Anlagenbestands und Markt in Deutschland

Betrachtet man ausschließlich den deutschen Markt, stellen 9.876 Biogasanlagen, wie in Abbildung 14 dargestellt, im Jahr 2022 das theoretische Anlageuniversum für Investoren dar. Die Anzahl der Biogasanlagen beinhaltet rund 240 Biomethan-Einspeiseanlagen. Während Biogasanlagen durch das im Jahr 2000 verabschiedete Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) regelrecht einen Boom erlebt haben, ist der Zubau durch die Novellierung des Gesetzes im Jahr 2012 deutlich zurück gegangen. Die 9.876 Biogasanlagen im Jahr 2022 verfügen gemeinsam über eine elektrische Leistung von 5.895 Megawatt. Das entspricht im Durchschnitt einer elektrischen Leistung von rund 600 kW pro Biogasanlage.

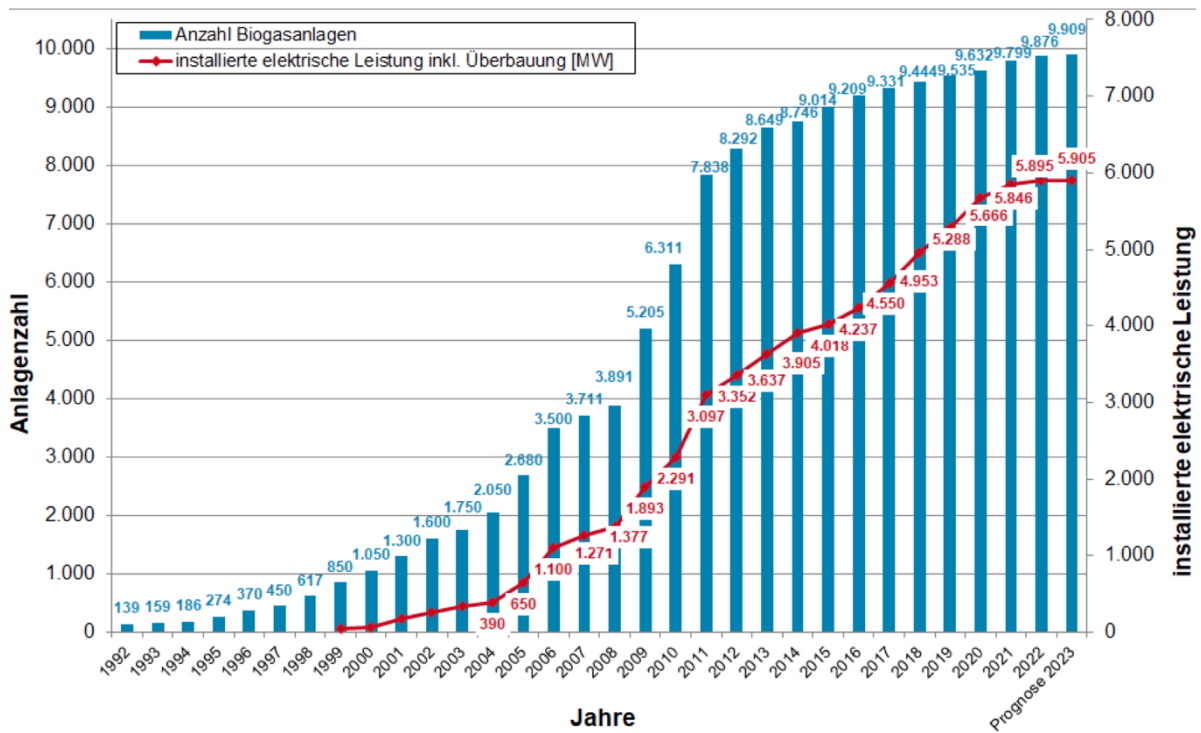


Abbildung 14: Entwicklung der Anzahl Biogasanlagen und der gesamten installierten elektrischen Leistung in Megawatt [MW] in Deutschland
 Quelle: Fachverband Biogas e.V. (2023)

Aus Tabelle 3 geht hervor, dass mehr als die Hälfte des Biogasanlagenbestandes sich in den Bundesländern Bayern, Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen befindet. Auch hinsichtlich der durchschnittlich installierten Anlagenleistung sind Bayern und Niedersachsen Spitzenreiter, wobei Baden-Württemberg auf Platz drei liegt und nicht Nordrhein-Westfalen wie bei der Anlagenanzahl. Die mittlere Leistung der Biogasanlagen ist in Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen am höchsten.

Tabelle 3: Verteilung und Leistung der Biogasanlagen nach Bundesländern

Bundesland	Anzahl Anlagen (2022)	installierte elektrische Leistung in MWel	durchschnittliche Anlagengröße in kWel
Nordrhein-Westfalen	1136	475	418,1
Rheinland-Pfalz	184	91	494,6
Saarland	16	8	500,0
Sachsen	323	166	513,9
Thüringen	276	144	521,7
Bayern	2707	1458	538,6
Schleswig-Holstein	887	511	576,1
Mecklenburg-Vorpommern	558	360	645,2
Baden-Württemberg	1026	668	651,1
Brandenburg	452	295	652,7
Hessen	238	163	684,9
Niedersachsen	1691	1360	804,3
Sachsen-Anhalt	366	323	882,5

Quelle: Fachverband Biogas e.V. (2023) und eigene Berechnung

Die Betrachtung auf Kreisebene in Abbildung 15 zeigt, dass im Hinblick auf die Anlagenanzahl und die installierte elektrische Leistung im Südosten und im Norden Deutschlands Schwerpunkte zu verzeichnen sind. Betrachtet man die mittlere Leistung, befinden sich die größten Anlagen im Nordosten Deutschlands.

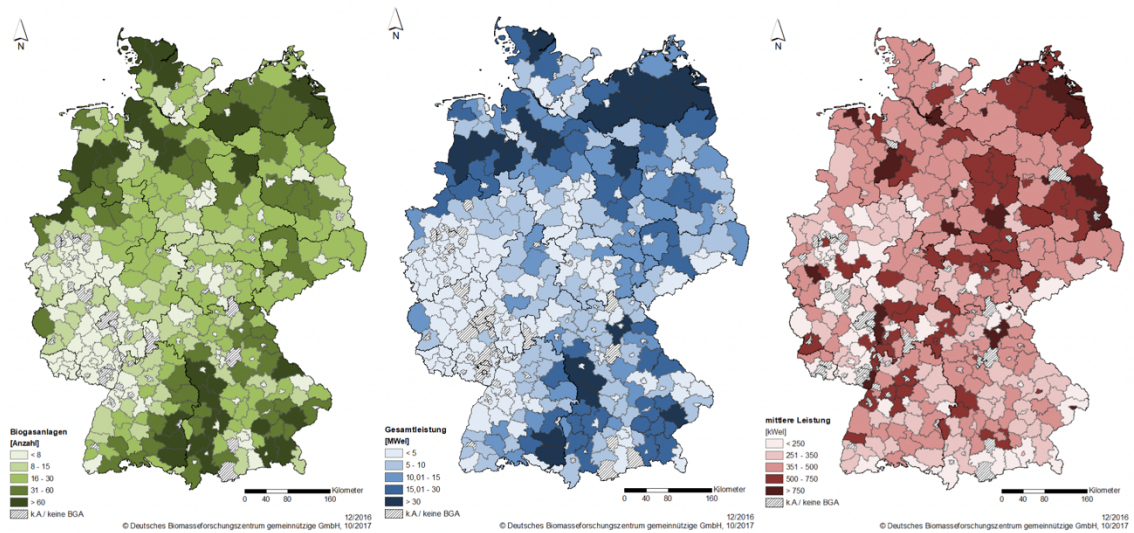
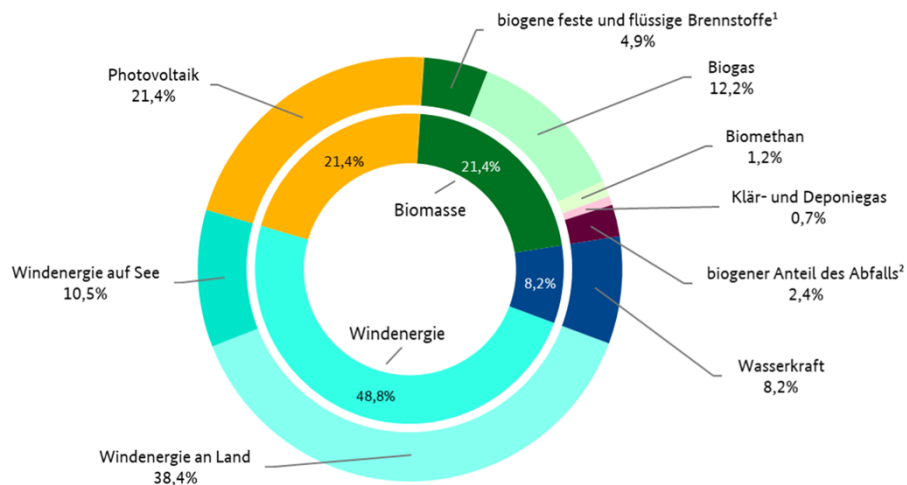


Abbildung 15: Verteilung der Anlagenzahl, der installierten elektrischen Anlagenleistung und der durchschnittlichen Anlagenleistung von Biogasanlagen in Deutschland auf Kreisebene
 Quelle: Daniel-Gromke, et al. (2017)

Im Jahr 2021 lag die Bruttostromerzeugung in Deutschland insgesamt bei 581,8 Mrd. kWh. Der Anteil aus erneuerbaren Energien beträgt 39,8%, was wiederum 233,6 Mrd. kWh entspricht (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2023). Welchen Anteil die verschiedenen erneuerbaren Energieträger an der Bruttostromerzeugung haben, ist Abbildung 16 zu entnehmen. Die Bruttostromerzeugung aus Biogas macht einen Anteil von 12,2% und die aus Biomethan einen Anteil von 1,2% aus.

Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2021

Gesamt: 233,6 Mrd. Kilowattstunden



¹ inkl. Klärschlamm; ² biogener Anteil des Abfalls in Abfallverbrennungsanlagen mit 50 % angesetzt
 Hinweis: Stromerzeugung aus Geothermie aufgrund sehr geringer Mengen (0,1%) nicht dargestellt

Abbildung 16: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland 2021
 Quelle: BMWK auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (2022)

Mit dem Strom aus Biogas können in Deutschland rechnerisch 9,58 Mio. Haushalte mit Strom versorgt werden und Anlagenbetreiber profitieren von einem Umsatzvolumen in Höhe von 13,2

Mrd. Euro. Das entspricht einem durchschnittlichen Umsatz von 1,3 Mio. Euro pro Biogasanlage. Die Branche verfügt über 52.000 Arbeitsplätze, was wiederum einem Durchschnitt von 5 Arbeitsplätzen pro Biogasanlage entspricht (Fachverband Biogas e.V., 2023).

2.2.2 Technologie und Funktionsweise einer Biogasanlage

Biogas entsteht durch anaerobe Fermentation organischer Masse. Hauptbestandteile des gebildeten Gasmischs sind Methan (50-75 Vol.-%) und Kohlendioxid (25-50 Vol.-%). Der Entstehungsprozess von Biogas bzw. der anaerobe Abbau organischer Masse lässt sich in die folgenden vier Phasen unterteilen, wobei diese in einem einstufigen Prozess zeitlich parallel stattfinden:

- Hydrolyse
- Acidogenese (Versäuerungsphase)
- Acetogenese (Essigsäurebildung)
- Methanogenese

Die Teilschritte des Entstehungsprozesses von Biogas sind in Abbildung 17 dargestellt. Zunächst wird das Ausgangsmaterial durch hydrolytische Bakterien zersetzt. Durch die „Hydrolyse“ entstehen einfache organische Verbindungen wie Aminosäuren, Fettsäuren und Zucker. Anschließend werden diese Zwischenprodukte durch säurebildende Bakterien weiter abgebaut. Das Ergebnis der „Acidogenese“ sind kurzkettige Fettsäuren aber auch geringe Mengen an Milchsäure und Alkoholen. Acetogene Bakterien setzen diese Produkte in Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid um. Den letzten Prozessschritt bildet die „Methanogenese“, bei der anaerobe methanogene Archaeen Essigsäure, Wasserstoff und Kohlenstoff zu Methan umwandeln (Friehe et al., 2016, S. 11; Lemmer & Oechsner, 2011, S. 85 ff.).

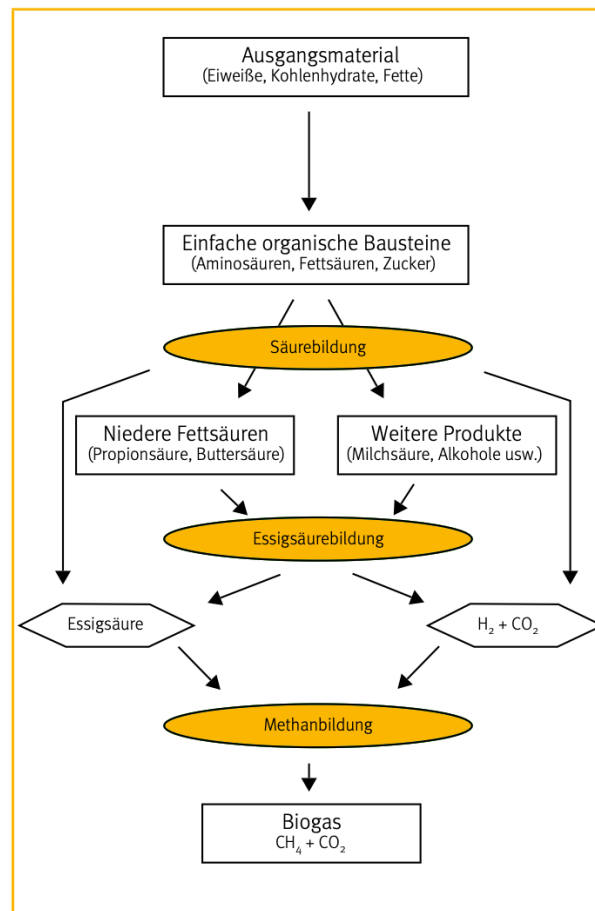


Abbildung 17: Schematische Darstellung des anaeroben Abbaus
Quelle: Friehe et al. (2016, S. 11)

Grundsätzlich können in Biogasanlagen nachwachsende Rohstoffe (Energiepflanzen), landwirtschaftliche Nebenprodukte sowie weitere organische Reststoffe als Energieträger eingesetzt werden. Rund 95% der Biogasanlagen werden auf Basis tierischer Nebenprodukte wie Gülle oder Festmist und nachwachsenden Rohstoffen betrieben. Darüber hinaus finden Bioabfälle sowie weitere Reststoffe aus Industrie, Gewerbe und Landwirtschaft in geringem Umfang Verwendung in Biogasanlagen. Organische Abfälle werden jedoch lediglich in rund 300 Biogasanlagen eingesetzt. Bei den Wirtschaftsdüngern sind Rindergülle mit 59% auf den massebezogenen Substrateinsatz, Schweinegülle mit 17% und Rinderfestmist mit 9% dominierend, während es bei den nachwachsenden Rohstoffen Maissilage (72%), Grassilage (12%) und Getreide-GPS (7%) sind (Daniel-Gromke et al., 2017, S. 16 f.).

Die typischen wertbestimmenden Faktoren unterschiedlicher Substrate sind die durch die Weender-Analyse bestimmbaren Futterwerte: Rohprotein (RP), Rohfett (RL), Rohfaser (RF), Kohlenhydrate (NfE). Auf Basis dieser lassen sich für einzelne Substrate deren Biogasertrag und Methangehalt ermitteln. Der Richtwert für die Biogasausbeute von Rindergülle zum Beispiel liegt unter Berücksichtigung eines Trockenmassegehalts von 10% bei 380 l_n/kg oTM. Der Methangehalt wird mit 55% angenommen. Rindermist hat bei einem Trockenmassegehalt von 25% einen Biogasertrag von 450 l_n/kg oTM. Nachwachsende Rohstoffe weisen höhere

Biogaserträge auf als Wirtschaftsdünger. Der Richtwert für Maissilage zum Beispiel liegt bei 650 l_n/kg oTM unter Berücksichtigung eines Trockenmassegehalts von 35%. Grassilage verfügt ebenfalls über 35% Trockenmasse, während der Biogasertrag bei 600 l_n/kg oTM liegt. (Döhler et al., 2013, S. 128 ff.).

Die oben beschriebene Vergärung der Substrate findet in luftdichten, wärmeisolierten und beheizten Gärbehältern, den so genannten Fermentern, statt. Lemmer & Oechsner (2011, S. 105) bezeichnen den Fermenter als Kernstück der Biogaserzeugungsanlage. Denysenko et al. (2016, S. 21 ff.) unterscheiden die Verfahren zur Biogaserzeugung nach verschiedenen Kriterien. Der Trockensubstanzgehalt der Substrate begründet eine grundsätzliche Einteilung der Biogastechnologie in Nass- und Feststoffvergärung. Entscheidend ist dabei die Pumpfähigkeit des Substrates, wobei bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen überwiegend die Nassvergärung in klassischen Rundbehältern zur Anwendung kommt. Ein weiteres Kriterium ist die Beschickung (Fütterung) der Biogasanlage. Es wird zwischen kontinuierlicher, quasikontinuierlicher und diskontinuierlicher Beschickung unterschieden. Außerdem kann der Entstehungsprozess von Biogas einphasig oder zweiphasig ausgestaltet sein. Die Anzahl der Prozessphasen stellt damit ein weiteres verfahrenstechnisches Unterscheidungskriterium dar. Auch die Prozesstemperatur kann variieren, sodass zwischen einem psychrophilen, mesophilen oder thermophilen Anlagenbetrieb unterscheiden werden kann.

Unabhängig von der Betriebsweise beschreiben Denysenko et al. (2016, S. 23) die vier Verfahrensschritte einer landwirtschaftlichen Biogasanlage:

1. Substratmanagement (Anlieferung, Lagerung, Aufbereitung, Transport und Einbringung),
2. Biogasgewinnung,
3. Gärrückstandslagerung, -aufbereitung und -ausbringung sowie
4. Biogasspeicherung, -aufbereitung und -verwertung.

Die einzelnen Verfahrensschritte sind in Abbildung 18 dargestellt.

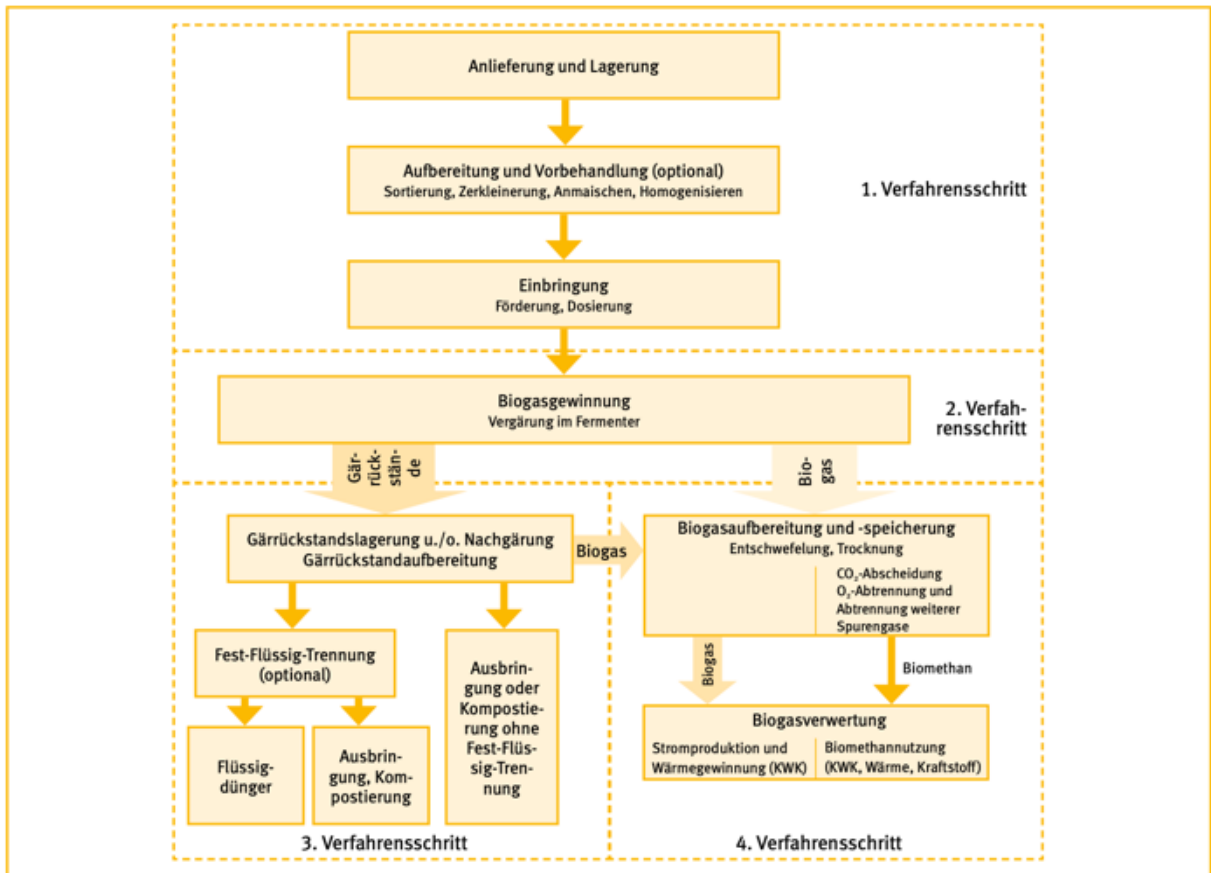


Abbildung 18: Allgemeiner Verfahrensablauf bei der Biogasgewinnung
 Quelle: Denysenko et al. (2016, S. 23)

Abbildung 19 zeigt das Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage. Im Fermenter finden die biologischen Abbauprozesse statt, bei denen das Biogas entsteht. Im Gärrestlager wird das ausgegaste Substrat gelagert, welches dann als landwirtschaftlicher Dünger zur Verfügung steht.



Abbildung 19: Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage
 Quelle: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2011)

Für das im Fermenter bzw. Nachgärer erzeugte Biogas gibt es unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten. Bei einem Großteil der Biogasanlagen erfolgt die dezentrale Verstromung des Rohgases vor Ort. Bei der Erzeugung von Strom mit einem Blockheizkraftwerk kann neben der elektrischen Energie auch die thermische Energie des Verbrennungsmotors in Nah- und Fernwärmenetzen genutzt werden. Alternativ kann Biogas nach einer entsprechenden Aufbereitung als Biomethan in das Erdgasnetz eingespeist werden und dezentral zur Strom- und Wärmeproduktion sowie als Kraftstoff genutzt werden (Fischer et al., 2016, S. 106).

2.2.3 Finanzierung und Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen

Finanzierung

Multipliziert man die installierte Leistung in Höhe von 5.895 MW der 9.876 Biogasanlagen in Deutschland mit den spezifischen Investitionskosten einer 500kW-Anlage in Höhe von rund 4.600 €/kW_{el} (Döhler et al., 2013, S. 288), kommt man zu dem Schluss, dass in den vergangenen Jahren über 27 Mrd. Euro in Biogasanlagen investiert wurden. Das entspricht im Umkehrschluss einem durchschnittlichen Investitionsvolumen von rund 2,7 Mio. Euro pro Biogasanlage.

Neben dem Eigenkapital stellen Banken klassischerweise Fremdkapital in Form eines Kredites zur Verfügung. Im Gegensatz zur landwirtschaftlichen Unternehmensfinanzierung (siehe Abbildung 20) bildet die Projektgesellschaft eine wirtschaftlich selbständige Einheit. Zins- und Tilgungsforderungen im Rahmen der Projektfinanzierung werden lediglich aus dem Cash-Flow der Biogasanlage bedient und es werden ausschließlich mit dem Projekt verbundene Sicherheiten gestellt (Friese & Dickhoff, 2015, S. 31 f.). Durch die veränderten Organisationsstrukturen haben, zusätzlich zur klassischen Kreditfinanzierung durch Bankdarlehen, alternative Finanzierungsmodelle wie Biogasfonds, mezzanine Finanzierung, Contracting sowie Leasing an Bedeutung gewonnen, wobei diese im Verhältnis zur Unternehmensfinanzierung und zur Projektfinanzierung eher seltener vorkommen (Grell & Weckbrodt, 2006, S. 12).

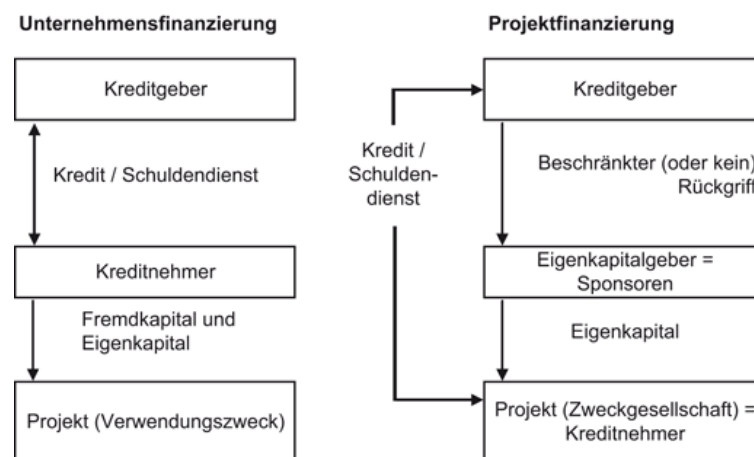


Abbildung 20: Traditionelle Kreditfinanzierung und traditionelle Projektfinanzierung
Quelle: Böttcher & Blattner (2010, S. 15)

Welche Finanzierungform für das jeweilige Vorhaben geeignet ist, ist abhängig von der Größe der Biogasanlage. Kleine Biogasanlagen sind in der Regel in den landwirtschaftlichen Betrieb integriert, werden zumeist von einzelnen Landwirten betrieben und sind in der Regel klassisch kreditfinanziert (Unternehmensfinanzierung) (Grell & Weckbrodt, 2006, S. 12). Bei der Unternehmensfinanzierung wird eine gute Bonität des Gesamtbetriebs vorausgesetzt, da im Gegensatz zur Projektfinanzierung, die Sicherheiten aus dem landwirtschaftlichen Betrieb genommen werden (Wagner et al., 2011, S. 2).

Bei größeren Biogasanlagen schließen sich immer häufiger mehrere Landwirte zusammen und gründen eine Projektgesellschaft. Neben Landwirten können verschiedene Partner wie Kommunen, Entsorgungsbetriebe, Industriebetriebe, Hersteller oder Projektentwickler beteiligt sein. Das unternehmerische Risiko verteilt sich in diesem Fall auf alle Gesellschafter. Ist der Landwirt vorwiegend für den Anlagenbetrieb verantwortlich, während die Biogasanlage mehrheitlich oder gesamt durch Fremdinvestoren finanziert ist, liegt das so genannten Betreibermodell vor (Wagner et al., 2011, S. 4).

Werden Privatpersonen als Investoren eingebunden, spricht man von „Bürgerbeteiligung“, wobei der Begriff nicht eindeutig definiert ist. Je nach Ausgestaltung des Beteiligungsmodells ist neben der direkten Beteiligung als Gesellschafter, auch die indirekte Beteiligung über Treuhandgesellschaften oder das Bereitstellen von Mezzaninkapital denkbar. Unter Mezzaninkapital fasst man Finanzierungsformen zusammen, die sowohl Eigenschaften von Eigenkapital als auch von Fremdkapital aufweisen. Beispielhaft sind die stille Beteiligung, Genussrechtskapital, Wandel- bzw. Optionsanleihen und Nachrangdarlehen zu nennen (Holstenkamp & Degenhart, 2013).

Die häufigste Rechtsform von Biogas-Projektgesellschaften stellt die GmbH & Co KG dar. Schaper et al. (2008) haben im Rahmen ihrer Arbeit die Rechtsform von 70 Biogasanlagen in Niedersachsen erhoben und kommen zu dem gleichen Ergebnis: 59% der untersuchten Biogasanlagen werden in der Rechtsform einer GmbH & Co. KG betrieben, während 20% der Anlagen die Rechtsform der GbR aufweisen und 10% als Einzelunternehmen geführt werden. Die übrigen Rechtsformen kommen nur in Einzelfällen vor.

In der Vergangenheit hat das Modell der Projektgesellschaft zunehmend an Bedeutung gewonnen und damit in diesem Zusammenhang auch die Projektfinanzierungen. Die Projektfinanzierung ist nach Tytko (2003, S. 13) wie folgt definiert:

„Investitionsobjekte werden dann als Projektfinanzierung klassifiziert, wenn eine sich selbst tragende Wirtschaftseinheit vorliegt, deren unternehmerische Aktivitäten nur auf Basis des Projekt-Cashflows und der Projektanlagen als einzige Sicherheit für die Kreditgeber finanziert werden sollen.“

Die Projektfinanzierung ist durch die Merkmale Cashflow-Orientierung (Cash-flow-related-lending), Risikoteilung (Risk Sharing) und bilanzexterne Finanzierung (Off-balance-sheet-financing) gekennzeichnet (Böttcher & Blattner, 2010, S. 7), was sie von der klassischen Unternehmensfinanzierung unterscheidet. Weitere Unterschiede zwischen der traditionellen Unternehmensfinanzierung und der traditionellen Projektfinanzierung sind in Abbildung 20 dargestellt.

Bei der Finanzierung von Biogasanlagen wird in der Regel ein Eigenkapitalanteil in Höhe von 20-30% durch die fremdfinanzierenden Banken gefordert (Degenhart & Holstenkamp, 2011, S. 34). Die Erhebung im Rahmen des Biogasmessprogramms III führt zu einem ähnlichen Ergebnis. Die Anlagen der Untersuchung weisen im Durchschnitt einen Fremdkapitalanteil von 69,7% und einen Eigenkapitalanteil von 30,3% auf. Wobei Abbildung 21 zeigt, dass die Anlagen BGA 17 und BGA 15 mit 98,3% und 97,5% einen deutlich höheren Fremdkapitalanteil aufweisen als der Durchschnitt. Die niedrigste Fremdkapitalquote weist dagegen BGA 19 mit 30,3% auf (Barchmann et al., 2021, S. 113).

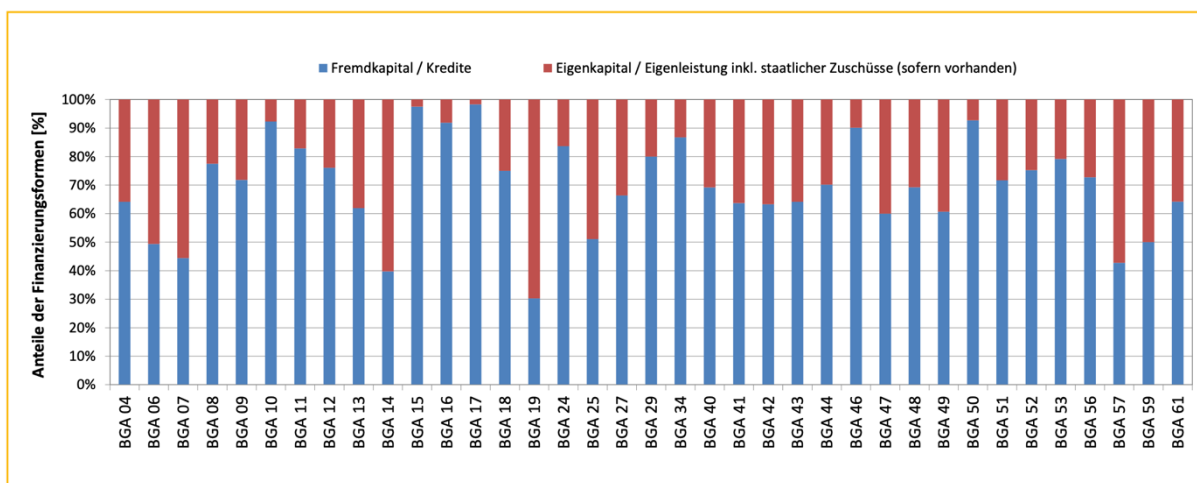


Abbildung 21: Anteilige Zusammensetzung der Anlagenfinanzierung ausgewählter Biogasanlagen
Quelle: Barchmann et al. (2021, S. 113)

Neben den Eigen- und Fremdkapitalgebern sind weitere Marktteilnehmer über Verträge mit der Projektgesellschaft verbunden, wie in Abbildung 22 vereinfacht dargestellt. Essenziell für die Projektfinanzierung sind planbare Cashflows aus Power Purchase Agreements (PPA) oder Einspeisevergütung auf der Einnahmenseite. Dem gegenüber stehen Verträge mit Marktteilnehmern, die zu Ausgaben führen, aber gleichzeitig den Anlagenbetrieb sicherstellen und Risiken absichern.

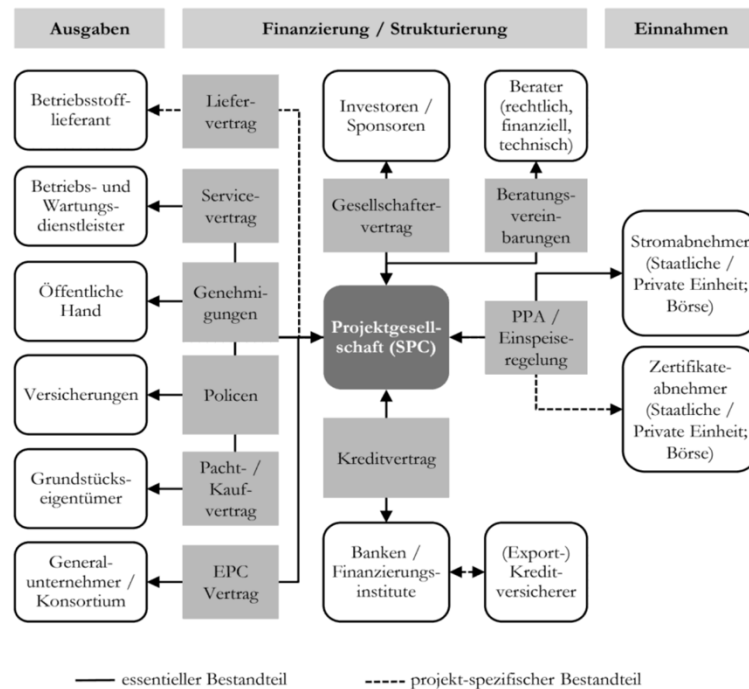


Abbildung 22: Vereinfachte Projektfinanzierungsstruktur am Beispiel erneuerbarer Energien
 Quelle: Friese & Dickhoff (2015, S. 41)

Die jährlichen Erträge (Einnahmen), die gegenüberstehenden jährlichen Kosten (Ausgaben) sowie die Höhe der (anfänglichen) Investitionskosten beeinflussen die Wirtschaftlichkeit einer Biogasanlage.

Wirtschaftlichkeit

Die spezifischen Investitionskosten einer Biogasanlage mit Vor-Ort-Verstromung liegen zwischen 3.500 €/kW_{el} bei großen Anlagen (1.000 kW_{el}) und 9.000 €/kW_{el} bei kleinen Anlagen (75 kW_{el}). Bei einer Biogasanlage mit Gasaufbereitung und -einspeisung liegen die Investitionskosten zwischen 9.100 €/Nm³*h bei großen Anlagen (700 Nm³/h) und 9.600 €/Nm³*h bei kleineren Anlagen mit Aufbereitung (400 Nm³/h) (Döhler et al., 2013, S. 288).

Biogasanlagen generieren Erträge durch den Verkauf von Strom, Wärme, Gas (Biogas oder Biomethan) sowie durch Entsorgungserlöse für Gärsubstrate oder den Verkauf von Gärrückständen. Außer bei Gaseinspeiseanlagen stellt der Verkauf und die Vergütung von Strom nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) die Haupteinnahmequelle dar. Der Verkauf von Wärme sowie von Gärresten ist in der Regel von untergeordneter Bedeutung (Herbes & Scholwin, 2015, S. 188; Döhler et al., 2016, S. 158).

Die Höhe der Einspeisevergütung nach dem EEG für 20 Jahre unterscheidet sich je nach Inbetriebnahmejahr, Leistung der Anlage, Art und Menge der eingesetzten Substrate sowie weiterer Kriterien (Döhler et al., 2016, S. 158). Das EEG als zentrales Steuerungselement für den Ausbau erneuerbarer Energien hat im Jahr 2000 das Stromeinspeisegesetz abgelöst und

wurde seitdem regelmäßig novelliert. Abbildung 23 zeigt die durchschnittliche EEG-Vergütung für Biomasseanlagen im Zeitverlauf.

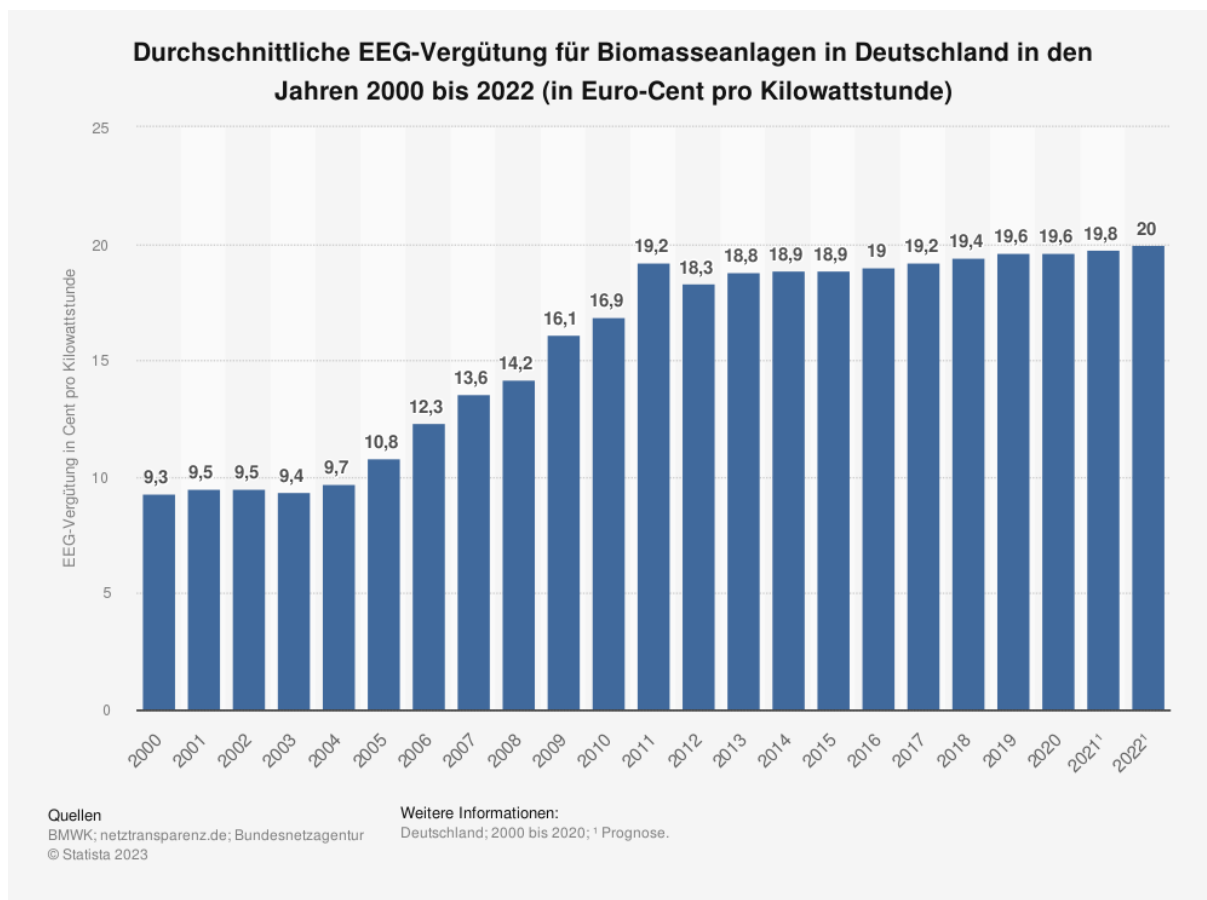


Abbildung 23: Durchschnittliche EEG-Vergütung für Biomasseanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2022 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde)
 Quelle: BMWK, (2022)

Auf der Kostenseite sind variable und fixe Kosten zu unterscheiden. Zu den variablen Kosten zählen die Substratkosten (bis zu 60% der Gesamtkosten), Kosten für Betriebsstoffe, Wartungs- und Reparaturkosten, Kosten für Laboranalysen sowie Zinskosten für Betriebsmittel (Umlaufvermögen). Investitionsabhängige Kosten wie Abschreibung, Zinsen und Versicherungen sowie Arbeitskosten sind den fixen Kosten zuzuordnen (Döhler et al., 2016, S. 161).

Die Gestehungskosten für Strom liegen zwischen 15,48 und 30,14 ct/kWh und für Biomethan zwischen 6,67 und 7,74 ct/kWh (Döhler et al., 2013, S. 286 ff.). Wobei das Biogas-Messprogramm III zu einem Mittelwert von 18,9 ct/kWh (Minimum 8,7 ct/kWh; Maximum 32,4 ct/kWh) für Strom kommt (Barchmann et al., 2021, S. 122 f.).

Auf Basis der Investitionskosten sowie der jährlichen Erträge und Aufwendungen lassen sich Aussagen zur Rentabilität von Biogasanlagen machen. Tabelle 4 zeigt die Rentabilität verschiedener Beispielanlagen, wobei die Gesamtinvestition, die jährlichen Erträge, die jährlichen Kosten sowie die Gesamtkapitalrendite (GKR) der Literatur entnommen sind. Da die Berechnung der Gesamtkapitalrendite in den zitierten Quellen nicht nachvollziehbar ist, wurde zur

besseren Vergleichbarkeit die GKR' als Verhältnis zwischen Gewinn p.a. und Gesamtinvestition berechnet. Die veröffentlichten Gesamtkapitalrenditen liegen zwischen -5,7% und 15,8%. Die errechneten Gesamtkapitalrenditen (GKR') liegen zwischen -5,0% und 18,9%. Betrachtet man die Veröffentlichungen isoliert, lässt sich die Tendenz erkennen, dass große Anlagen wirtschaftlicher sind als kleine Anlagen. Vergleicht man die Veröffentlichungen jedoch untereinander, ist zu erkennen, dass diese Aussage nicht bestätigt wird. Bei Eder (2012, S. 199) erzielt die kleinere Anlage mit einer installierten elektrischen Leistung von 110 kW und Wärmekonzept eine GKR' von 18,9%, während beim FNR (Döhler et al., 2016) die Beispielanlage III mit einer elektrischen Leistung von 250 kW eine negative GKR' von -0,7% aufweist. Bei den Beispielrechnungen der Landwirtschaftskammer NRW (Gruber, 2011) ist ebenfalls die Biogasanlage mit der höheren elektrischen Leistung wirtschaftlicher als die mit der geringeren.

Tabelle 4: Wirtschaftlichkeit von Beispielanlagen in der Literatur

Quelle	Beispielanlage	Installierte Leistung	Gesamtinvestition	Erträge p.a.	Kosten p.a.	Gewinn p.a.	GKR	GKR'
Eder (2012)	Milchviehbetrieb mit 100 GC + 20 ha Silomais, Abwärmenutzung im eigenen Betrieb	55 kW	217.288 €	67.624 €	64.262 €	3.362 €		1,5%
	Milchviehbetrieb mit 100 GV + 100 ha Silomais, Abwärmenutzung im eigenen Betrieb	263 kW	675.000 €	312.645 €	261.226 €	51.419 €		7,6%
	Milchviehbetrieb mit 100 GV + 20 ha Silomais + 1000 t Geflügelkot, Abwärmenutzung im eigenen Betrieb	110 kW	351.267 €	134.052 €	84.230 €	49.822 €		14,2%
	Milchviehbetrieb mit 100 GV + 20 ha Silomais + 1000 t Geflügelkot, 50% Abwärme genutzt	110 kW	401.667 €	166.037 €	90.127 €	75.910 €		18,9%
FNR (2016)	I 80% Gülle, 20% NaWaRo	75 kW	694.208 €	147.836 €	179.054 €	31.218 €	-4,8%	-4,5%
	II 30% Gülle, 70% NaWaRo	150 kW	977.077 €	253.072 €	301.789 €	48.717 €	-5,7%	-5,0%
	III 20% Gülle, 80% NaWaRo	250 kW	1.416.162 €	404.529 €	413.873 €	9.344 €	-3,2%	-0,7%
	IV 60% Gülle, 40% NaWaRo	250 kW	1.514.372 €	400.390 €	398.554 €	1.836 €	4,7%	0,1%
	V 20% Gülle, 80% NaWaRo	500 kW	2.295.750 €	779.893 €	712.139 €	67.754 €	10,5%	3,0%
	VI 20% Gülle, 80% NaWaRo	750 kW	3.028.639 €	1.130.641 €	1.003.197 €	127.444 €	13,1%	4,2%
	VII (EEG) 100% NawaRo	1.000 kW	3.514.140 €	1.456.932 €	1.279.846 €	177.086 €	14,8%	5,0%
VII (DV) 100% NawaRo	1.000 kW	3.914.009 €	1.575.943 €	1.357.176 €	218.767 €	15,8%	5,6%	
Landwirtschaftskammer NRW (2011)	Rindergülle (2400t/a), Rindermist (450 t/a), Getreide-GPS 1.300 t Maissilage (900t/a), Grassilage (700t/a)	180 kW	1.000.000 €	318.571 €	277.202 €	41.369 €	10,9%	4,1%
	35% Rindergülle (4000t/a), 500t Hühner trockenkot, 8750t Maissilage	500 kW	2.200.000 €	842.700 €	715.939 €	126.761 €	13,3%	5,8%

Quelle: Eder (2012, S. 194 ff.); Döhler et al. (2016, S. 152 ff.); Gruber (2011)

2.2.4 Risiken und Risikomanagement bei Investitionen in Biogasanlagen

Auf der einen Seite werden Biogasanlagen in der Literatur als Sachwertinvestition mit stabilen Erträgen, vor allem durch das EEG, dargestellt. Auf der anderen Seite beschäftigen sich viele Forschungsarbeiten der Agrarökonomie mit den Risiken und dem Risikomanagement bei Investitionen in Biogasanlagen, wie folgende Beispiele zeigen.

Rauh, Berenz & Heißenhuber (2007)

Rauh et al. (2007) argumentieren, dass die relativ hohen Vergütungssätze aus dem EEG das vorhandene Investitionsrisiko in eine Biogasanlage nicht eliminieren. Die Autoren kritisieren die häufig statisch durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei der Planung von Biogasanlagen. Zum einen kann fehlendes technisches Know-How beim Betreiber dazu führen, dass die vom Planungsbüro kalkulierten Parameter nicht erreicht werden. Zum anderen wirken sich in der Realität zahlreiche Einflussfaktoren positiv und negativ auf den Betrieb der Biogasanlage aus, sodass die Betriebsergebnisse von Jahr zu Jahr variieren können. Vor diesem

Hintergrund haben sie das unternehmerische Risiko beim Betrieb einer Biogasanlage mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode geschätzt. Ihre Risikoanalyse zeigt den enormen Einfluss der Risikofaktoren auf die Varianz des Gewinns.

Grundlage der Simulation ist eine Beispielanlage mit einer elektrischen Leistung von 104 kW und einer Investitionssumme von 360.000 Euro. Darüber hinaus werden weitere Annahmen hinsichtlich der vorhandenen Anbaufläche für Mais, dem Rinderbestand, dem elektrischen und thermischen Wirkungsgrad sowie der Wärmeabgabe getroffen, die als fixe Variablen in die Wirtschaftlichkeitsberechnung einfließen. Die Eingangsgrößen der folgenden Risikofaktoren werden simuliert, wobei eine Dreiecksverteilung der folgenden Variablen angenommen wird:

- Flächenertrag Mais
- TM-Gehalt Mais
- oTM-Gehalt Mais
- Lagerverluste Silo
- oTM-Gehalt Rindergülle
- Abbaurate Substrate
- Gasertrag Maissilage
- Gasertrag Rindergülle
- Methangehalt Maissilage
- Methangehalt Rindergülle
- Zündölanteil
- Elektrischer Wirkungsgrad (realisiert)
- Eigenstromverbrauch

Es wurden verschiedene Zielgrößen analysiert, wobei nur die Ergebnisse für die Zielgröße Gewinn detailliert erläutert wurden. Die Monte-Carlo-Simulation umfasste 1.000 Läufe und hat zur in Abbildung 24 dargestellten Häufigkeitsverteilung und Verteilungsfunktion des Gewinns geführt.

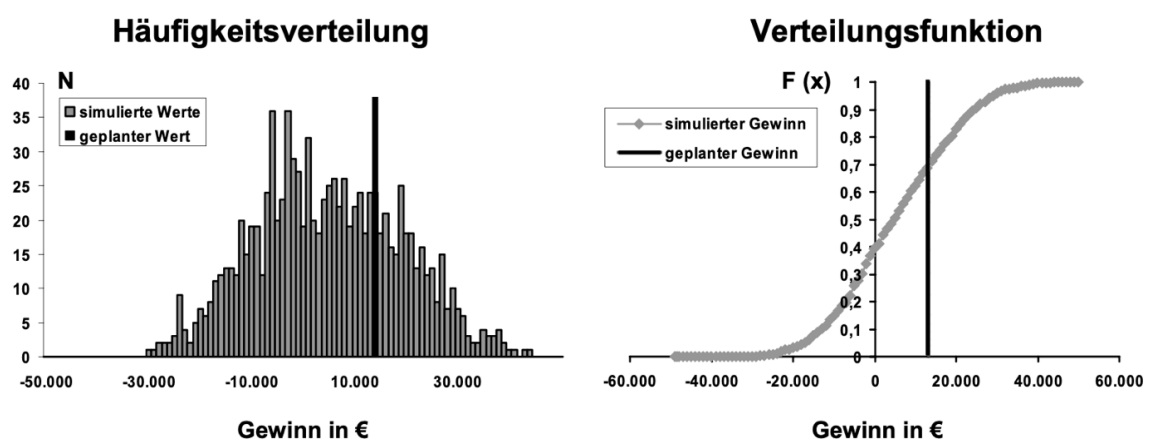


Abbildung 24: Häufigkeitsverteilung und Verteilungsfunktion des Gewinns für den Beispielbetrieb
Quelle: Rauh et al. (2007)

Die Analyse zeigt, dass der in der Planungsphase statisch kalkulierte Gewinn von ca. 16.000 Euro lediglich mit einer Wahrscheinlichkeit von 30% erreicht oder überschritten wurde. Im Gegensatz dazu liegt die Wahrscheinlichkeit in die Verlustzone zu geraten bei ca. 40%. Der simulierte Erwartungswert des Gewinns liegt lediglich bei 4.300 Euro. Darüber hinaus haben die Autoren ermittelt, dass das größte Risikopotenzial beim TM-Gehalt von Mais liegt. Allein die Variation dieses Risikofaktors zwischen dem Minimalwert von 20% und einem Maximalwert von 41,6% kann die Biogasanlage in die Verlustzone bringen (siehe Abbildung 25).

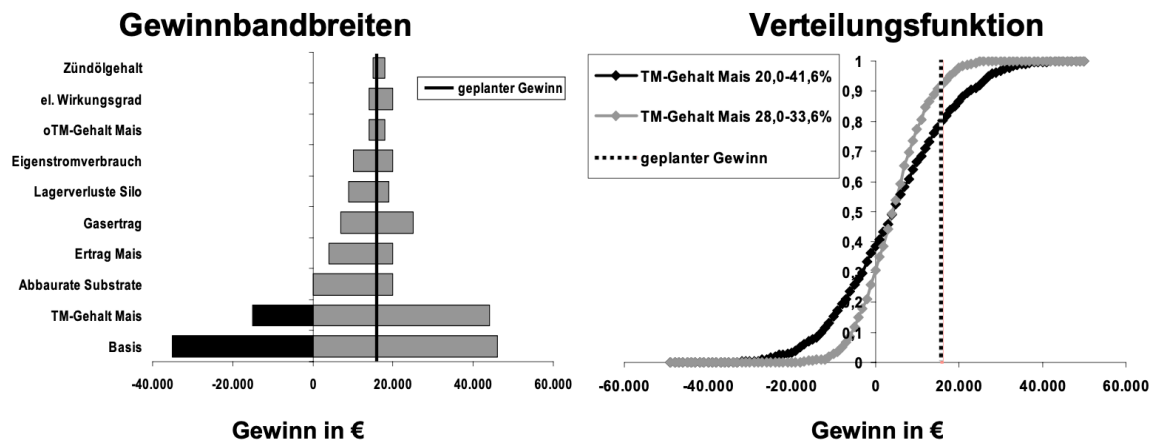


Abbildung 25: Bandbreiten des Gewinns bei der Simulation einzelner Variablen und Veränderung der Verteilungsfunktion durch eine Optimierungsmaßnahme
Quelle: Rauh et al. (2007)

Der Beitrag unterstreicht die Problematik statischer Modellrechnungen in der Planungsphase und liefert eine Begründung, warum die kalkulierten Ergebnisse in der Praxis häufig nicht erreicht werden. Rauh et al schlussfolgern, dass die Monte-Carlo-Simulation ein geeignetes Instrument für Anlagenplaner sowie -betreiber darstellt, um Schwachpunkte der Biogasanlage zu identifizieren und Optimierungsmaßnahmen abzuleiten.

Berenz, Bochmann & Heißenhuber (2008)

Ziel der Arbeit von Berenz et al. (2008) ist es die ökonomischen Risiken von Biogasanlagen zu identifizieren und zu quantifizieren. Die Grundlage für ihre Arbeit bilden drei Biogasanlagen mit einer installierten Leistung von 536 kW (Anlage 1), 290 kW (Anlage 2) und 270 kW (Anlage 3) in Bayern. Die Autoren haben in Ihrem Beitrag „Strategien zur Risikominimierung beim Betrieb von Biogasanlagen“ den Biogasprozess in vier Hauptphasen unterteilt und für jede Phase die in Abbildung 26 dargestellten internen und externen Risiken identifiziert.

Phase	interne Risiken	externe Risiken
Substrat- bereitstellung	Schlagkraft der Mechanisierung / Terminkosten, Entfernungen, Qualität der Lagerung / Verluste	Witterung: Erträge und Qualitäten, Verhältnisse der Infrastruktur, Preisniveaus konkurrierender Kulturen, Pachtpreisniveau
Biogas- erzeugung	Rationsgestaltung, Ausnutzung der Gaspotenziale der Substrate	Zuverlässigkeit der Anlage, v. a. Substrateintrag, Pumpen und Rührwerke
Biogas- verwertung	realisierte Nutzungsgrade, Störungen, Bedienungsfehler	Kulanzen, Ansprüche des Energieversorgungs- unternehmens
Gärrest- verwertung	Nährstoffausnutzung = Einsparungspotenzial mineralischer Dünger	Einschränkungen der Gärrestaubsbringung

Abbildung 26: Interne und externe Risiken zu den vier Phasen des Biogasprozesses
Quelle: Berenz et al. (2008, S. 189)

Die externen Risiken sind nicht unmittelbar beeinflussbar, während die internen Risiken durch gezielte Aktivitäten gemindert werden können. Untersucht werden die Erfolgskennzahlen „Gewinn des Betriebszweiges“ sowie „kalkulatorisches Betriebszweigergebnis“ entsprechend den Vorschriften der Betriebszweigabrechnung DLG.

Die für das Jahr 2006 ermittelten Gewinne der drei Biogasanlagen sind nur bedingt auf zukünftige Zeiträume übertragbar, da verschiedene Unsicherheitspotenziale existieren und das Ergebnis beeinflussen. Die Stabilität der ökonomischen Zielgrößen wird mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation bestimmt. In einem zweiten Schritt wird durch eine ceteris paribus Simulation die Auswirkung einzelner unsicherer Parameter auf die Zielgröße analysiert (siehe Abbildung 27).

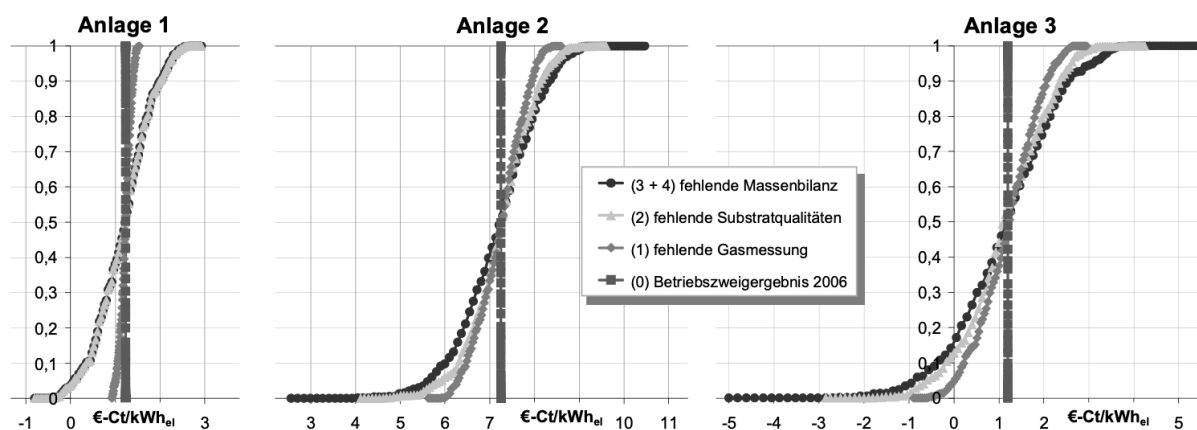


Abbildung 27: Verteilungsfunktion des Gewinns der drei Anlagen zu kumulierten Unsicherheitsbereichen

Quelle: Berenz et al. (2008, S. 211)

Die mit Unsicherheit behafteten Parameter dürfen in der Simulation in plausiblen Bandbreiten variieren. Die Werteintervalle werden auf Basis von Betriebstagebüchern, Analysewerten sowie Daten aus offiziellen Statistiken und Literaturdaten abgeleitet.

Möller 2008

Möller (2008) begründet seine Arbeit mit den oben beschriebenen Risiken beim Betrieb von Biogasanlagen und begegnet diesen mit der Entwicklung eines Qualitätsstandard für Planung und Betrieb von Biomethananlagen zur Verbesserung der Prozessabläufe, Funktionssicherheit, Effektivität und Wirtschaftlichkeit. Der Qualitätsstandard bewertet die Bereiche „Qualitätsmanagement“, „Betrieb der Anlage“ sowie „Überwachung und Sicherheit“. Die fünf Biomethananlagen umfassende Testauditierung hat erhebliche Defizite der Anlagenbetreiber im Bereich Qualitätsmanagement aufgezeigt. Ziel ist es, dass Anlagenbetreibern zunehmend den hohen Managementaufgaben beim Betrieb einer Biomethananlage gerecht werden, wobei die regelmäßige Auditierung den Prozess der kontinuierlichen Verbesserung unterstützen soll.

Riessen 2010

Bevor Riessen (2010), wie in Kapitel 2.1.5 beschrieben, die Risikowirkung einer Biogasanlageninvestition auf das landwirtschaftliche Portfolio untersucht, hat er zunächst die Einzelrisiken einer Biogasanlage sowie das investitionsspezifische Gesamtrisiko analysiert. Grundlage bildet die Sensitivitätsanalyse eines vollständigen Finanzplans einer Modellbiogasanlage. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse variieren die Inputvariablen um $\pm 10\%$, $\pm 20\%$ und $\pm 30\%$ und beeinflussen damit den ursprünglichen Investitionsendwert in Höhe von 3.879.436 Euro. Die Investitionsinputfaktoren sowie die positiven Wirkungen auf den Endwert des vollständigen Finanzplans (Output) bei einer Variation von $\pm 10\%$ sind in Abbildung 28 dargestellt.

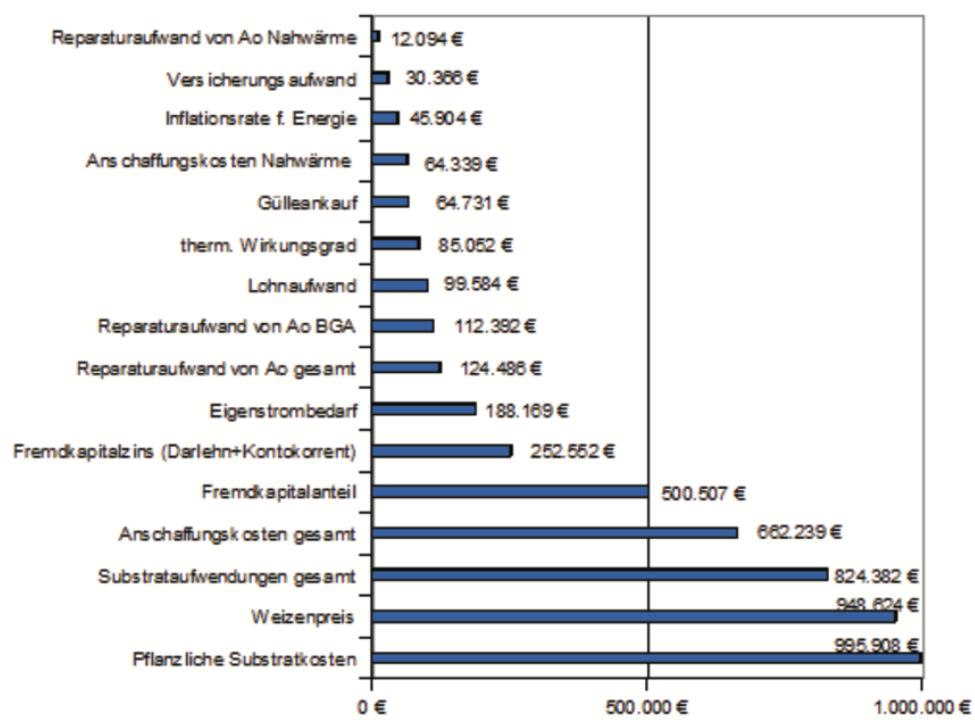


Abbildung 28: Positive Beeinflussung des Endwertes bei Inputabweichung von +10%
Quelle: Riessen (2010, S. 116)

Die Investitionsinputfaktoren sowie die negativen Wirkungen auf den Endwert des vollständigen Finanzplans (Output) bei einer Variation von $\pm 10\%$ sind in Abbildung 29 dargestellt.

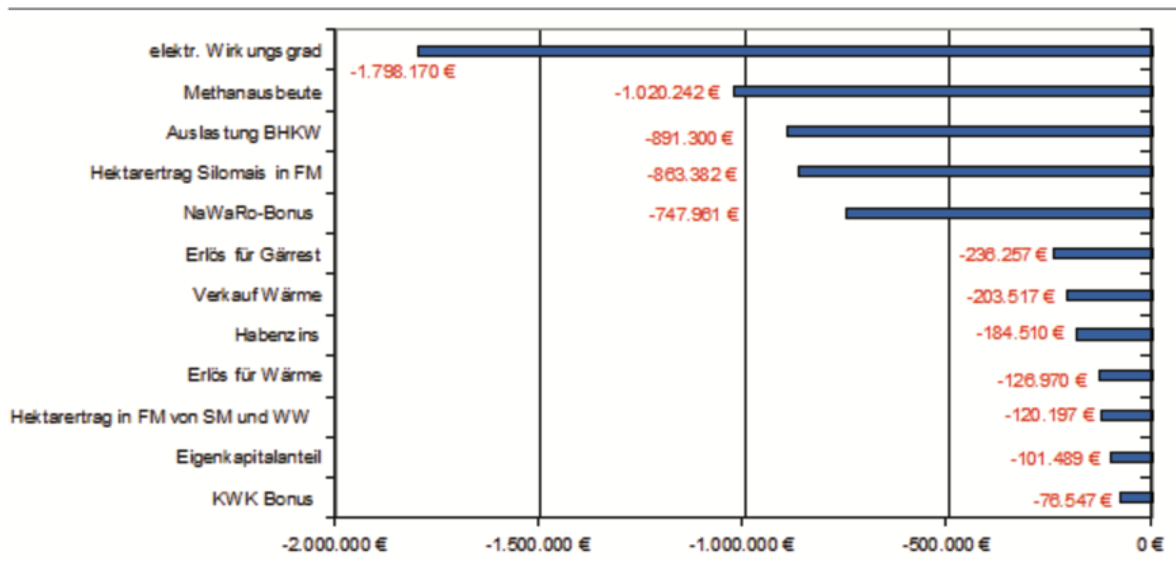


Abbildung 29: Negative Beeinflussung des Endwertes bei Inputabweichung von -10%
Quelle: Riessen (2010, S. 112)

Aus dem Zusammenspiel der dargestellten Einzelrisiken hat der Autor das Investitionsspezifische Gesamtrisiko ermittelt. Die Investitionsinputs sind als normalverteilte Zufallsvariablen in die Monte-Carlo-Simulation eingeflossen, sodass im Ergebnis eine Wahrscheinlichkeitsverteilung des Investitionsendwertes ermittelt werden konnte (siehe Abbildung 30).

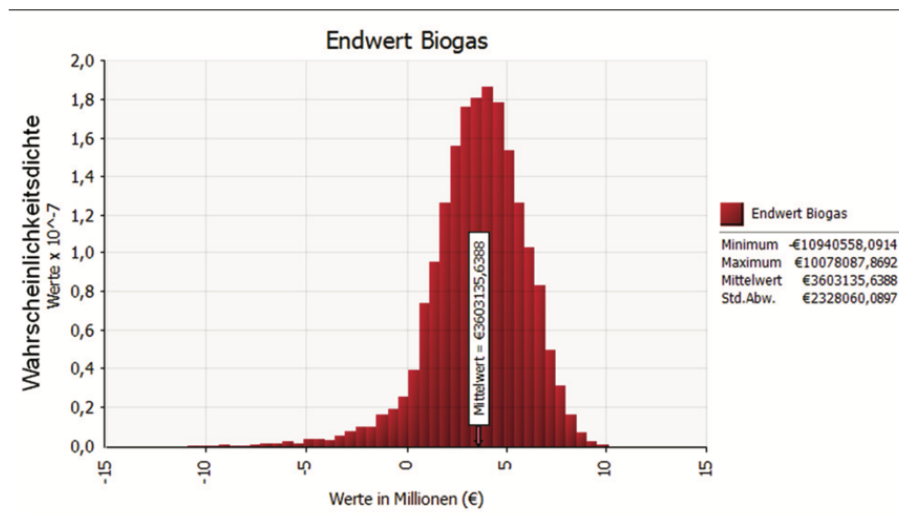


Abbildung 30: Wahrscheinlichkeitsverteilung des Investitionsendwertes
Quelle: Riessen (2010, S. 146)

Der Mittelwert des Simulationsergebnisses beträgt 3.603.136 Euro bei einer Standardabweichung von 64,4%. Die Ergebnisse sind nicht normalverteilt, sondern linkschief, wobei zwischen dem Minimum des Endwertes des vollständigen Finanzplans und dem Maximum eine Differenz von mehr als 20 Mio. Euro liegt. Die Eigenkapitalrendite entspricht im Mittel einer Höhe von 12,36%, bei einer Standardabweichung von 7,98%.

Hill 2012

Hill (2012) hat im Rahmen seiner Arbeit ein Modell entwickelt, welches die simulative Risikoanalyse von Biomethanprojekten erlaubt. Der Aufbau richtet sich nach der von Gleißner (2011) beschriebenen Struktur: Risikoidentifikation, Risikoquantifizierung und Risikosimulation. Im Rahmen der Risikoidentifikation hat der Autor die Risikobereiche „Rohstoffe“, „Infrastruktur“, „Absatzmarkt“, „Finanzmarkt“ und „Politik“ ermittelt. Die Risikobereiche umfassen wiederum Risikogebiete und diese wiederum einzelne Faktoren. Hill unterstellt für 123 der 126 identifizierten Risikofaktoren eine Pert-Alt-Verteilung. Für den Risikofaktor „Novellierungsabstände des EEG“ unterstellt er eine Uniform-Verteilung und für die Risikofaktoren „Eintrittswahrscheinlichkeit der Übernahme“ sowie „Eintrittswahrscheinlichkeit der Übernahme von Wartung- und Instandhaltungskosten des Netzanschlusses“ eine Binomial-Verteilung. Durch Anwendung der Monte-Carlo-Methode wurden folgende Zielgrößen simuliert:

- Analyse der Risikotragfähigkeit (risikobedingte Liquiditätsreserve, Deckungsrate der Liquiditätsreserve, Insolvenzwahrscheinlichkeit)
- Shortfallanalyse der Ausschüttungen (Shortfall-Wahrscheinlichkeit, durchschnittliche Planwertabweichung, maximale Planwertabweichung)
- Shortfallanalyse der Eigenkapitalverzinsung (Shortfallwahrscheinlichkeit, durchschnittliche Risikoerwartung, maximale Risikoerwartung)
- Shortfallanalyse der Schuldendienstdeckungsrate (Shortfallwahrscheinlichkeit, durchschnittliche Risikoerwartung, maximale Risikoerwartung, das Jahr in dem die Schuldendienstdeckungsrate ihre maximale Dichte erfährt)

Hill kommt zu dem Ergebnis, dass die Berücksichtigung sämtlicher im Risikoportfolio enthaltenen Risikofaktoren zu einer sehr großen Schwankungsbreite der betrachteten Risikomaße und Wirtschaftlichkeitskennzahlen geführt hat. Die Arbeit zeigt weiterhin, dass die Aussagefähigkeit aggregierter Risikosimulationen durch Überlagerungseffekte negativ beeinträchtigt wird. Diese können durch die isoliert durchgeführte Risikoanalysen eliminiert werden. Hervorgehoben wurde der Risikobereich „Politik“, da er die geringste Wahrscheinlichkeit aufweist die Planwerte der Investoren zu unterschreiten. Kommt es jedoch zu einer Unterschreitung, ist die Auswirkung des Risikos besonders groß.

Böttcher 2013

Böttcher (2013) betont die Bedeutung stabiler und verlässlicher Cashflows, da diese bei einer Projektfinanzierung die einzige Quelle der Kreditbedienung und Eigenmittelverzinsung sind. Er unterscheidet die Phase der Risikoidentifikation, Risikoallokation und Risikoquantifizierung. Ähnlich wie Berenz et al. (2008) unterteilt Böttcher die Risikoidentifikation eines Biogas-Projekts hinsichtlich der Beeinflussbarkeit durch die Projektbeteiligten. Projektendogene Risiken

können von der Projektgesellschaft oder anderen Projektbeteiligten kontrolliert werden, während projektexogene Risiken von außen auf das Projekt einwirken (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Übersicht über exogene und endogene Risiken

Endogene Risiken	Exogene Risiken
Fertigstellungsrisiko (4.4)	Technisches Risiko im weiteren Sinne
Management- und Betriebsrisiko (3.2, 3.4)	Ressourcenrisiko (4.2)
Absatzrisiko (3.1)	Zuliefererrisiko (3.3, 4.1)
Abandonrisiko	Marktrisiko (3.1)
Technisches Risiko i. e. S. (4.2, 4.3)	Vertragsrisiko (3.1, 3.2, 3.3, 3.4 und 5.1)
	Wechselkursrisiko
	Rechts- und Regulierungsumfeld (3.1, 3.3)
	Inflationsrisiko
	Zinsänderungsrisiko
Force-Majeure-Risiko	

Quelle: Böttcher (2013, S. 29)

Die Projektfinanzierung hat zum Ziel durch vertragliche Einbindung die Risiken auf die Projektbeteiligten zu verteilen (Risikoallokation). Auf Grund der mangelnden Quantifizierbarkeit der Einzelrisiken wird ein pauschaler Sicherheitsabschlag in Höhe von 20% auf den prognostizierten Energieertrag vorgenommen.

Herbes & Scholwin (2015)

Herbes & Scholwin (2015) unterscheiden in ihrem Beitrag technische und biologische Risiken sowie kommerzielle Risiken im Betrieb von Biogasanlagen. Die Autoren fassen die technischen und biologischen Risiken wie in Tabelle 6 dargestellt zusammen und beschreiben ihre wirtschaftlichen Auswirkungen.

Tabelle 6: Risiken und ihre wirtschaftlichen Auswirkungen

Risiko	wirtschaftliche Auswirkungen			
	typisch		Min-Max	
	Dauer in Tagen pro Jahr	Ertragsminderung während der Dauer in %	Dauer in Tagen pro Jahr	Ertragsminderung während der Dauer in %
Technische Risiken aus der Anlagendimensionierung				
Anwendung fehlerhafter Daten	0	0	365	5-20
Dimensionierungsfehler bei der Ver- und Entsorgung	0	0	5-100	5-20
Dimensionierungsfehler hinsichtlich Substratqualität, Substratmenge und Störstoffen in den zugeführten Substraten	0	0	20-365	5-30
Dimensionierungsfehler bei der Energieabgabe	0	0	5-30	5-20
Nichtnutzbarkeit der stofflichen Endprodukte	0	0	365	10-30
Dimensionierungsfehler hinsichtlich der Emissionen	0	0	365	5-100
Dimensionierungsfehler hinsichtlich Technologieauswahl und technischer Auslegung der Anlage	0	0	365	5-30
Technische Risiken aus dem Anlagenbetrieb				
Probleme bei der Ver- und Entsorgung der Anlage	5	10	0-30	5-50
Schwankungen der Substratqualität, Schwankungen der Substratmenge und Störstoffe in den zugeführten Substraten	0-5	5	0-60	0-10
Ausfall von Anlagentechnik	10	50	5-30	0-100

Eintreten außergewöhnlicher Prozesszustände	0-10	bis 100	0-30	50-100
Störungen der Abnahme bzw. der Abgabe von stofflichen Endprodukten	0	0	0-50	0-5
Probleme bei der Energieabgabe	3	bis 50	0-20	30-100
Mangelhafte Überwachung der gesamten Anlage	5	10	0-50	10-30
Biologische Risiken aus dem Anlagenbetrieb				
Überhöhte Lager- und Siliiverluste bei der Substratbereitstellung	365	0	10-365	0-15
Prozessstörungen der Biogasproduktion:				
1. Zufuhr von Substrat falscher Qualität oder falscher Mengen,	5	10	0-60	5-30
2. Schnelle Änderungen der Substratqualität,	5	10	0-30	5-20
3. Unregelmäßige Zugabe von Substrat	0-5	5	0-60	0-10
4. Zu kurze Verweilzeiten des Substrats,	0	0	0-365	5-20
5. Starke Temperaturschwankungen und schnelle Temperaturänderungen	0	0	0-15	5-25

Quelle: Herbes & Scholwin (2015, S. 186 f.)

Weiterhin werden unter den technischen und biologischen Risiken Management-Risiken aus dem Anlagebetrieb subsumiert. Die Autoren betonen, dass die Qualität des Managements einer Anlage extrem große Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb habe. Die Praxis zeige, dass allein durch Verbesserung des Anlagenmanagements Ertragssteigerungen im zweistelligen Prozentbereich möglich seien. Qualifikation und Identifikation des Anlagenpersonals mit der Anlage sowie die Einhaltung der technischen Vorgaben und technische Einrichtungen zur Anlagenüberwachung sind für ein erfolgreiches Anlagenmanagement von sehr großer Bedeutung.

Bei den kommerziellen Risiken sind diese aus Ertragspositionen sowie diese aus Aufwandspositionen zu unterscheiden. Auf der Ertragsseite ergibt sich das größte Risiko aus der Grundvergütung für den produzierten Strom sowie die Nichteinhaltung von Grenzwerten oder der mangelnden Dokumentation für den Bezug von Boni. Dabei handelt es sich um politische Risiken, für die kein aktives Risikomanagement möglich ist.

Auf der Aufwandsseite ist das Preissteigerungsrisiko der Biomasse ein entscheidender Risikofaktor. Eine Steigerung von 10-20% der Kosten für Biomasse kann eine typische BGA bereits in die Verlustzone treiben. Daher sollte bereits bei der Standortsuche die Verfügbarkeit von Substraten und die notwendige Größe des Einzugsgebiets berücksichtigt werden. Wenn die Biomasse nicht selbst erzeugt wird, sind die Verträge zum Bezug von Biomasse ein wichtiger Hebel im Risikomanagement. Sie sollten möglichst langfristig und lediglich mit geringen vertraglich vereinbarten, Preissteigerungen verbunden sein. Darüber hinaus sollten die Verträge zur Risikominimierung folgende Parameter zur Qualität der Biomasse haben, welche im Rahmen des Qualitätsmanagements kontrolliert werden müssen:

- Abrechnung nach Trockenmasse
- Einhaltung von Grenzwerten bei Rohfaser und Rohasche
- Einhaltung von Qualitätsparametern bezüglich der Zerkleinerung
- Störstofffreiheit

Außerdem beschreiben Herbes & Scholwin (2015) Preissteigerungsrisiken, die sich aus den Kosten für Eigenstrom, Instandhaltung bzw. Wartungsverträgen und Zinsen ergeben.

2.3 Schlussfolgerungen und Formulierung der Hypothesen

Die Portfoliotheorie wurde entwickelt, um das Investitionsverhalten an Kapitalmärkten zu erklären und um das Risiko-Rendite-Verhältnis von Wertpapierinvestitionen zu optimieren. Auch wenn die zugrunde liegenden Annahmen des Modells vielfach kritisiert wurden, ist die Grundaussage, nämlich dass sich Diversifikation positiv auf das Risiko-Rendite-Verhältnis eines Portfolios auswirkt, unumstritten und hat die Praxis des Portfolio- und Risikomanagements maßgeblich beeinflusst. Die Popularität des Modells hat dazu geführt, dass es zunehmend auch für andere Assetklassen als Wertpapiere Anwendung gefunden hat. Beinhofer (2009) zum Beispiel hat die Portfoliotheorie in der Forstwirtschaft angewandt, Penny (1982) sowie Kangari & Riggs (1988) für Investitionen in Immobilien und Kobzar (2006) im Ackerbau.

Es ist naheliegend, dass die Erkenntnisse der Portfoliotheorie Einzug in die Branche der erneuerbaren Energien gefunden haben, da es sich um kapitalintensive Projekte handelt, deren Parameter Schwankungen unterliegen, die es aus Risikosicht zu reduzieren gilt.

Im Fokus der Forschung steht aktuell die Analyse von Portfolios, die Projekte unterschiedlicher Technologien und Ressourcen umfassen (vgl. Bühler, 2007; Küppers, 2008). Weiterhin liegen Veröffentlichungen vor, bei denen Portfolien gleicher, jedoch fluktuierender Erzeugungstechnologien wie Windenergie- oder Photovoltaikanlagen, hinsichtlich des Portfolioeffekts untersucht wurden (vgl. Chaves-Schwintek, 2013; Borchert & Schemm, 2007). Die Risikoforschung im Bereich der Biogaserzeugung liegt im Schwerpunkt in der Betrachtung von Einzelrisiken und deren Übertragbarkeit auf das investitionsspezifische Gesamtrisiko von Einzelprojekten (vgl. Riessen, 2010; Reise, 2012; Hill, 2012) oder dem Risikodiversifikationspotenzial des landwirtschaftlichen Portfolios (Riessen, 2009). Der Portfolioeffekt und die Korrelation der Risiken von verschiedenen Biogasanlagen untereinander fand bisher kaum Beachtung.

Bei den vorgestellten Arbeiten ist der betrachtete Anlageraum bzw. die Stichprobe im Verhältnis klein. Bei Dunlop (2004) liegen Daten von 22 Windstandorten in Europa vor, Borchert & Schemm (2007) berücksichtigen 16 Messpunkte, Wiese et al. (2008) zehn Wind- sowie zehn Photovoltaik-Projekte und Chaves-Schwintek (2013) analysiert neun Windparks in Deutschland und neun Windparks weltweit. Ein Großteil der Arbeiten vergleicht den Portfolioeffekt einzelner zufällig zusammen gestellte Portfolios untereinander. Lediglich Borchert & Schemm (2007) ermitteln effiziente Portfolios und untersuchen welche Anlagen in den effizienten Portfolios enthalten sind.

Biogasanlagen als Sachwertinvestitionen unterscheiden sich in Ihren Eigenschaften von Wertpapieren, aber auch von anderen erneuerbaren Energien – nicht zuletzt dadurch, dass der

Energieträger Biomasse im Gegensatz zu Wind- und Solarenergie mit Kosten verbunden ist. Gleichzeitig handelt es sich bei Biomasse um keine fluktuierenden Energieträger, sodass in Planungsrechnungen von Biogasanlagen regelmäßig konstante Ertragsströme angenommen werden. Dass Rückflüsse aus Investitionen in Biogasanlagen trotz Lagerbarkeit der Substrate und der garantierten Einspeisevergütung durch das EEG durchaus volatil sein können, zeigt die Bedeutung der Risikoforschung zur Biogaserzeugung in der Agrarökonomie. Die in Kapitel 2.2.4 vorgestellten Beiträge haben eine Vielzahl von Einflussfaktoren beschrieben, welche die Wirtschaftlichkeit eines Biogasprojektes beeinflussen können. Ein Großteil der Arbeiten basiert auf Modellen mit denen untersucht wird, welchen Einfluss die Variierung der Risikofaktoren auf eine Erfolgsgröße hat, wobei im Rahmen der Simulationen unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Inputfaktoren angenommen werden. Alle zitierten Arbeiten haben große Schwankungsbreiten der Erfolgsgrößen ermittelt.

Gegenstand der bisherigen Untersuchungen stellt das investitionsspezifische Gesamtrisiko der einzelne Biogasanlage dar. Der Diversifikationseffekt eines Portfolios, das aus mehreren Biogasanlagen besteht, wurde bisher nicht untersucht, obwohl Portfoliobildung auf dem Markt zu beobachten ist. Diese Forschungslücke stellt die Grundlage dieser Arbeit und folgender Forschungsfrage dar:

Wie und in welchem Umfang können Investoren durch Anwendung der Portfoliotheorie das Risiko-Rendite-Verhältnis bei Investitionen in Biogasanlagen positiv beeinflussen?

Da die Portfoliotheorie als Risikomanagementansatz für Investitionen in Wertpapiere entwickelt wurde, stellt sich ferner die Frage, ob das Modell überhaupt für Investitionen in Biogasanlagen angewandt werden kann. Ähnlich wie bei anderen Assetklassen bzw. Technologien erneuerbarer Energien lässt sich kritisieren, dass die restriktiven Annahmen der Portfoliotheorie auch bei Investitionen in Biogasanlagen nicht erfüllt sind. Insbesondere die fehlende Teilbarkeit der Investitionsobjekte und die fehlende sofortige Liquidierbarkeit stellen Besonderheiten der Sachwertinvestition gegenüber Wertpapieren dar. Reise (2012) argumentiert außerdem, dass reale Entscheider bei Investitionen in Biogasanlagen nur begrenzt rational handeln. Chaves-Schwintek (2013) betont darüber hinaus, dass die Annahme normalverteilter Renditen bei Kapitalanlagen, die keine Wertpapiere sind, nicht haltbar ist und dass die Analyse der Korrelation eine der größten Herausforderungen darstellt. Dennoch konnte ein positiver Effekt auf das Rendite-Risiko-Verhältnis durch Portfoliobildung bei Wind- und Photovoltaik-Projekten gezeigt werden.

Bei börsennotierten Wertpapieren steht eine umfangreiche Datenbasis historischer Kursentwicklungen zur Verfügung, die für empirische Arbeiten genutzt werden können. Für Biogasanlagen sind vergleichbare Betriebsdaten im Allgemeinen kaum vorhanden und vor allem nicht öffentlich zugänglich. Gleiches gilt für andere Technologien erneuerbarer Energien, sodass

ein Großteil der vorstehend zitierten Arbeiten auf Simulationen und Expertenmeinungen beruht. Trotz dieser Einschränkungen wurde die Portfoliotheorie bereits erfolgreich für die Untersuchungen des Diversifikationseffektes bei erneuerbaren Energien eingesetzt, sodass sich daraus die erste These dieser Arbeit ableiten lässt:

- 1) Die Portfoliotheorie, als klassischer Risikomanagementansatz für Investitionen in Wertpapiere, lässt sich auch für Investitionen in Sachanlagen wie Biogasanlagen anwenden.

Bei Wertpapieren stellen Kursschwankungen das Risiko dar, während bei fluktuierenden erneuerbaren Energien wie Wind- oder Sonnenenergie, deren Dargebot schwankt und das Risiko darstellt. Die Erzeugung und Verstromung von Biogas sind dagegen unabhängig von kurzfristigen Witterungsverhältnissen. Im Gegensatz zu Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen hat man es bei Biogasanlagen nicht mit fluktuierenden Energieträgern zu tun. Die Substrate für den Betrieb von Biogasanlagen sind lagerbar und ganzjährig verfügbar, sodass in der Regel von einem stabilen Anlagenbetrieb ausgegangen wird und nur geringere Renditeschwankungen erwartet werden, die zum Beispiel auf die Managementleistung zurückzuführen sind. Gleichzeitig stellen Ertrags- bzw. Renditeschwankungen die Voraussetzung für eine Risikoreduktion durch Diversifizierung dar. Das Diversifikationspotenzial ergibt sich aus dem unsystematischen bzw. anlagenspezifischen Teil des Gesamtrisikos einer Biogasanlage. Die zweite These dieser Arbeit lautet demnach:

- 2) Sowohl durch Markowitz-Optimierung als auch durch naive Diversifikation lässt sich das Risiko von Investitionen in Biogasanlagen im Verhältnis zur Rendite reduzieren, wobei das anlagenspezifische Risiko den Umfang begrenzt.

Wenn durch die Investition in mehrere Biogasanlagen ein Portfolioeffekt erzielt werden kann, stellt sich die Frage, welche Anlagen bzw. Kombinationen für die Portfoliobildung besonders geeignet sind. Es ist davon auszugehen, dass Anlagen die sich in ihren Eigenschaften, wie zum Beispiel der Größe oder dem Standort unterscheiden, weniger korrelieren als Anlagen, die eine starke Ähnlichkeit aufweisen. Neben der Korrelation beeinflussen die Parameter Rendite und Risiko der Einzelanlagen die zu optimierenden Portfolioeigenschaften. Wenn vor allem die Analyse der Korrelationen und die Verfügbarkeit von Daten die Herausforderungen bei der Anwendung des Modells darstellt, kann es für den Praxisfall von Vorteil sein allgemeingültige Zusammenhänge zu ermitteln. Wenn sich die Modellparameter durch die Eigenschaften der Biogasanlagen erklären lassen, können Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Investitionsentscheidungen abgeleitet werden. Diesen Annahmen folgt die dritte und letzte These dieser Arbeit:

- 3) Die Modellparameter Rendite, Risiko und Korrelation lassen sich erklären, wodurch allgemeingültige Handlungsempfehlungen für Investoren abgeleitet werden können

3 Datengrundlage und Methode

3.1 Datengrundlage

3.1.1 Datenerhebung

Im Jahr 2019 gab es in Deutschland 9.535 Biogasanlagen mit einer gesamten installierten elektrischen Leistung von 5.288 Megawatt (Fachverband Biogas e.V., 2023). Wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben, werden Biogasanlagen in der Regel von einer Projektgesellschaft (in der Rechtsform einer GmbH & Co. KG) betrieben. Kapitalgesellschaften sind gemäß § 325 HGB verpflichtet Jahresabschlüsse beim Bundesanzeiger offenzulegen. Das gleiche gilt gemäß § 264a HGB für Personengesellschaften, bei denen keine natürliche Person voll haftet, wie bei der GmbH & Co. KG. Der Umfang der Offenlegungspflicht ist abhängig davon in welche der in §§ 267 und 267a HGB beschriebenen Größenklassen das Unternehmen einzuordnen ist. Wenn zwei der in Tabelle 7 beschriebenen Schwellenwerte über- oder unterschritten sind, erfolgt die Einordnung des Unternehmens in die nächste Größenklasse.

Tabelle 7: Umschreibung der Größenklassen nach §§ 267 und 267a HGB

	Kleinstunternehmen (§ 267a HGB)	Kleine Unternehmen (§ 276 Abs. 1 HGB)	Mittelgroße Unternehmen (§ 276 Abs. 2 HGB)	Große Unternehmen (§ 276 Abs. 3 HGB)
Bilanzsumme	< 0,35 Mio. €	< 6 Mio. €	< 20 Mio. €	> 20 Mio. €
Umsatzerlöse	< 0,7 Mio. €	< 12 Mio. €	< 40 Mio. €	> 40 Mio. €
Anzahl MA	< 10	< 50	< 250	> 250

Quelle: §§ 267 und 267a HGB (eigene Darstellung)

Kleinstunternehmen müssen ihren Jahresabschluss beim Bundesanzeiger lediglich hinterlegen. Dabei wird der Jahresabschluss nicht im elektronischen Bundesanzeiger veröffentlicht. Kleine Unternehmen müssen nur eine verkürzte Bilanz und den Anhang offenlegen und keine Angaben zur Gewinn- und Verlustrechnung (GuV) machen. Mittelgroße Unternehmen dürfen ebenfalls eine verkürzte Bilanz einreichen, wobei diese um die Posten gemäß § 327 HGB zu ergänzen ist. Außerdem müssen mittelgroße Unternehmen neben der GuV, den Anhang, den Lagebericht sowie rechtsformspezifische Dokumente offenlegen. Große Unternehmen sind verpflichtet die vollständige Bilanz, die GuV, den Anhang, den Lagebericht sowie rechtsformspezifische Dokumente offenzulegen (Lachnit & Müller, 2017, S. 7).

Auf der Internetseite des Bundesanzeigers sind die Jahresabschlüsse der offenlegungspflichtigen Unternehmen einsehbar, wobei der Umfang, wie oben beschrieben, stark variieren kann. Über die Suchfunktion der Internetseite des Bundesanzeigers lassen sich alle Ergebnisse von Unternehmen auflisten, deren Name den Begriff „Biogas“ enthält. Darüber hinaus lässt sich

der „Bereich“ weiter einschränken. Für die weiteren Analysen ist der Bereich „Rechnungslegung/Finanzberichte“ mit dem Unterpunkt „Jahresabschlüsse“ von besonderem Interesse. Am 14.04.2019 konnten 13.866 Datensätze identifiziert werden, die den genannten Kriterien entsprechen (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Übersicht zur Datenerhebung im Bundesanzeiger

Datenquelle:	www.bundesanzeiger.de
Abrufdatum:	14.04.2019
Suchbegriff:	Biogas
Suchbereich:	Rechnungslegung/Finanzberichte → Jahresabschlüsse
Ergebnisse:	13.866 Datensätze

Quelle: Eigene Darstellung

Im Rahmen der Datenerhebung wurden zunächst alle 13.866 Datensätze bestehend aus:

- dem Namen der Gesellschaft (der den Begriff Biogas enthält),
- dem Sitz der Gesellschaft,
- der Angabe auf welches Wirtschaftsjahr sich der Jahresabschluss bezieht, sowie
- dem Datum an dem der Jahresabschluss beim Bundesanzeiger veröffentlicht wurde,

exportiert.

Jahresabschlüsse müssen gemäß HGB jährlich aufgestellt und im elektronischen Bundesanzeiger veröffentlicht werden, sodass auf ein Unternehmen (Name der Gesellschaft) in der Regel mehrere veröffentlichte Jahresabschlüsse entfallen (Paneldaten). Es konnten 2.638 eindeutige Namen bzw. Biogas-Gesellschaften identifiziert werden, die am genannten Abrufdatum im Mittel 5,23 Jahresabschlüsse veröffentlicht haben.

Rund 50% der 2.638 Biogas-Gesellschaften weisen die Rechtsform einer GmbH & Co. KG auf. Anders als bei einer typischen Kommanditgesellschaft ist der persönlich und unbegrenzt haftende Gesellschafter (Komplementär) keine natürliche Person, sondern eine Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH) (Stute, 2015, S. 7). Die weiteren 50% der identifizierten Biogas-Gesellschaften weisen größtenteils die Rechtsform einer GmbH auf. Es ist möglich, dass ein Teil dieser Gesellschaften mit beschränkter Haftung ausschließlich gegründet wurden um als Komplementärin einer GmbH & Co. KG zu fungieren. Häufig enthält der Name dieser Komplementär-Gesellschaften den Zusatz „Verwaltung“ oder „Verwaltungs“, wie die folgenden Beispiele in Tabelle 9 zeigen.

Tabelle 9: Beispiele für die Firmierung von Biogas-Projektgesellschaften in der Rechtsform GmbH & Co. KG und deren Komplementärinnen

Projektgesellschaft	Komplementärin
Biogas Behrenhoff GmbH & Co. KG	Biogas Behrenhoff Verwaltungs-GmbH
Hansen Biogas GmbH & Co. KG	Biogas Hansen Verwaltungs GmbH
Varnholt Biogas GmbH & Co. KG	Varnholt Biogas Verwaltung-GmbH

Quelle: www.bundesanzeiger.de (eigene Darstellung)

Von den 2.638 identifizierten Biogas-Gesellschaften wurden 579 Gesellschaften aus der Liste entfernt, die den Zusatz „Verwaltung“ oder „Verwaltungs“ enthalten, da davon auszugehen ist, dass es sich um Komplementär-Gesellschaften handelt, die selbst kein operatives Geschäft betreiben und ausschließlich der Haftungsbeschränkung dienen.

Die veröffentlichten Jahresabschlüsse der verbleibenden 2.059 identifizierten Biogas-Gesellschaften wurden im elektronischen Bundesanzeiger aufgerufen und auf die folgenden zwei Kriterien hin überprüft:

- Die Bilanzstruktur lässt die Vermutung zu, dass die Gesellschaft in den Bau oder Erwerb einer Biogasanlage investiert hat und diese betreibt
- Die Gesellschaft weist in mindestens fünf Jahresabschlüssen ein Jahresergebnis aus

Die Bilanzstruktur einer Gesellschaft, die eine Biogasanlage betreibt, ist in der Regel durch ein im Verhältnis zur Bilanzsumme hohes Anlagevermögen gekennzeichnet. Auf der Passivseite ist der Eigenkapitalanteil in der Regel wesentlich niedriger als der Fremdkapitalanteil, da ein großer Teil der Investition durch Bankdarlehen finanziert ist.

Aufgrund der oben beschriebenen größenabhängigen Erleichterungen bei der Offenlegungspflicht enthalten nicht alle Datensätze einen Jahresüberschuss bzw -fehlbetrag. Deshalb wird jeder Jahresabschluss dahin gehend überprüft ob entweder in den Bilanzen unter dem Eigenkapital der Jahresüberschuss bzw. -fehlbetrag oder eine separate Gewinn- und Verlustrechnung ausgewiesen ist. Diese Erfolgsgröße wird neben der Bilanz benötigt, um Aussagen über die Rentabilität der Biogas-Gesellschaft zu treffen. Es verbleiben 180 Biogas-Gesellschaften deren Jahresabschlüsse den beschriebenen Kriterien entsprechen. Zu diesen 180 Gesellschaften wurden die Daten bis zum Stand 31.05.2021 ergänzt.

Die veröffentlichten Bilanzdaten der 180 Biogas-Gesellschaften werden entsprechend der Gliederung in § 266 HGB erhoben, wobei die Gliederungstiefe der mit Buchstaben bezeichneten Posten entspricht. Tabelle 10 zeigt die Gliederung der Bilanz gemäß 266 Abs. 2 HGB. Darüber hinaus wird als Erfolgsgröße, der im Posten Eigenkapital enthaltene

Jahresüberschuss bzw. Jahresfehlbetrag separat erfasst, um im Folgenden Rentabilitätsbetrachtungen vornehmen zu können.

Tabelle 10: Gliederung der Bilanz gemäß § 266 Abs. 2 HGB

Aktivseite	Passivseite
<p>A. Anlagevermögen</p> <p style="padding-left: 20px;">I. Immaterielle Vermögensgegenstände</p> <p style="padding-left: 20px;">II. Sachanlagen</p> <p style="padding-left: 20px;">III. Finanzanlagen</p> <p>B. Umlaufvermögen</p> <p style="padding-left: 20px;">I. Vorräte</p> <p style="padding-left: 20px;">II. Forderungen und sonstige Vermögensgegenstände</p> <p style="padding-left: 20px;">III. Wertpapiere</p> <p style="padding-left: 20px;">IV. Kassenbestand, Bundesbankguthaben, Guthaben bei Kreditinstituten und Schecks</p> <p>C. Rechnungsabgrenzungsposten</p> <p>D. Aktive latente Steuern</p> <p>E. Aktiver Unterschiedsbetrag aus der Vermögensverrechnung</p>	<p>A. Eigenkapital</p> <p style="padding-left: 20px;">I. Gezeichnetes Kapital</p> <p style="padding-left: 20px;">II. Kapitalrücklage</p> <p style="padding-left: 20px;">III. Gewinnrücklage</p> <p style="padding-left: 20px;">IV. Gewinnvortrag/Verlustvortrag</p> <p style="padding-left: 20px;">V. Jahresüberschuss/Jahresfehlbetrag</p> <p>B. Rückstellungen</p> <p>C. Verbindlichkeiten</p> <p>D. Rechnungsabgrenzungsposten</p> <p>E. Passive latente Steuern</p>

Quelle: § 266 Abs. 2 HGB (eigene Darstellung)

Die gewonnenen Rohdaten werden bereinigt und für die folgende Analyse aufbereitet, wobei folgende Anpassungen vorgenommen werden:

- Rumpfwirtschaftsjahre werden entfernt
- Einheitlicher Ausweis bei negativem Eigenkapital
- Ausreißer und Extremwerte werden entfernt

In der Regel deckt sich das Wirtschaftsjahr der Biogas-Gesellschaften mit dem Kalenderjahr. Nur wenige Biogas-Gesellschaften haben ein vom Kalenderjahr abweichendes Wirtschaftsjahr bestimmt. Das bedeutet, dass der Jahresabschluss sich nicht auf einen Zeitraum vom 01.01. bis zum 31.12. eines Jahres bezieht, sondern beispielsweise auf einen Zeitraum vom 01.07. bis zum 30.06. eines Folgejahres. Unter bestimmten Umständen kann es notwendig sein, für das Wirtschaftsjahr einen Zeitraum festzulegen, der weniger als zwölf Monate umfasst. Diese so genannten Rumpfwirtschaftsjahre sind unter anderem dann notwendig, wenn das Wirtschaftsjahr vom Kalenderjahr auf einen anderen Zeitraum umgestellt wird. Die

Jahresabschlussdaten die sich auf einen Zeitraum von weniger als zwölf Monaten beziehen, werden entfernt, um eine Vergleichbarkeit der Daten sicherzustellen.

Gemäß § 268 Nr. 3 HGB ist bei Kapitalgesellschaften am Schluss der Bilanz auf der Aktivseite ein „nicht durch Eigenkapital gedeckter Fehlbetrag“ auszuweisen, wenn das Eigenkapital durch Verluste aufgebraucht ist und sich ein Überschuss der Passivposten über die Aktivposten ergibt. Der § 264c HGB sieht vor, dass bei der GmbH & Co KG analog ein „nicht durch Vermögenseinlagen gedeckter Verlustanteil persönlich haftender Gesellschafter bzw. von Kommanditisten“ auf der Aktivseite auszuweisen ist. Bei den veröffentlichten Jahresabschlüssen der Biogas-Gesellschaften wird das Eigenkapital teilweise saldiert und mit einem negativen Vorzeichen auf der Passivseite ausgewiesen. Bei diesen Datensätzen wurde eine Anpassung vorgenommen, sodass ein positives Eigenkapital einheitlich auf der Passivseite ausgewiesen ist und ein rechnerisch negatives Eigenkapital auf der Aktivseite angegeben wird. Das Eigenkapital auf der Passivseite kann demnach im Minimum einen Wert von Null annehmen. Unabhängig davon, ob es sich um einen „Nicht durch Eigenkapital gedeckten Fehlbetrag“ einer GmbH oder einen „nicht durch Vermögenseinlagen gedeckten Verlustanteil“ einer GmbH & Co. KG handelt, wird ein rechnerisch negatives Eigenkapital auf der Aktivseite unter dem Posten „Fehlbetrag/Verlustanteil“ einheitlich zusammengefasst.

Projektgesellschaften, wie die hier untersuchten Biogas-Gesellschaften, werden in der Regel gegründet, bevor die Investition in eine Biogasanlage getätigt wird. In dem Zeitraum vor der Investition ist das Anlagevermögen im Verhältnis zur Bilanzsumme sehr gering, da die Biogasanlage noch nicht gebaut oder erworben wurde. Ebenso ist es möglich, dass eine Biogas-Gesellschaft eine Biogasanlage veräußert und das Anlagevermögen in diesem Jahr stark sinkt, die Gesellschaft jedoch nicht (direkt) liquidiert wird. In diesen Fällen kann es zu stark verzerrten Rentabilitätskennzahlen kommen. Wenn die Bilanzsumme sehr gering ist, weil die Biogasanlage z.B. noch nicht gebaut wurde, durch die laufenden Kosten der Gesellschaft jedoch ein hoher Verlust entsteht. Demnach wurden Extremwerte oder Ausreißer entfernt, wenn das Anlagevermögen und die Bilanzsumme am Anfang oder am Ende der Zeitreihe im Verhältnis sehr niedrig waren und dadurch eine unverhältnismäßig niedrige oder hohe Gesamtkapitalrendite entstanden ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass aus der Grundgesamtheit von 9.876 Biogasanlagen in Deutschland eine Stichprobe von 180 Biogas-Gesellschaften in die folgende Untersuchung einfließt. Wobei zu berücksichtigen ist, dass es möglich ist, dass eine Projektgesellschaft mehrere Biogasanlagen betreibt oder eine große Biogasanlage von mehreren Projektgesellschaften betrieben wird. Beispielhaft wird an dieser Stelle das Luftbild der Biogasanlage in Reppinichen gezeigt (siehe Abbildung 31).



Abbildung 31: Luftbild der Biogasanlage in Reppinichen
Quelle: Google Maps (2019)

Entsprechend dem Luftbild weist diese Biogasanlage drei Gärstrecken, jedoch nur eine Fahr-siloanlage auf. Während die Fahr-siloanlage vermutlich gemeinschaftlich genutzt wird, wird die Anlage von drei Projektgesellschaften betrieben:

- Reppinichen Erste Biogas Betriebs GmbH
- Reppinichen Zweite Biogas Betriebs GmbH
- Reppinichen Dritte Biogas Betriebs GmbH

Für jede dieser drei Biogas-Gesellschaften sind separate Jahresabschlussdaten beim Bundesanzeiger veröffentlicht. Die Bilanzdaten der 180 Biogas-Gesellschaften sind im Anhang 1 auf CD-ROM/USB-Stick dargestellt und werden im Folgenden beschrieben.

3.1.2 Deskriptive Statistik

3.1.2.1 Rechtsform der Biogas-Gesellschaften

Von den 180 Biogas-Gesellschaften der Stichprobe weisen 94 die Rechtsform einer GmbH auf, 83 die einer GmbH & Co. KG und 3 die einer UG (haftungsbeschränkt) & Co. KG. Dies entspricht einem Verhältnis von 52%, 46% bzw. 2%. Betrachtet man den Gesamtmarkt in Deutschland, sind die meisten Biogas-Projektgesellschaften in der Rechtsform der GmbH & Co. KG organisiert. Da der Ausweis des Jahresergebnisses ein Kriterium bei der Datenerhebung darstellt, konnten einige GmbH & Co. KGs nicht berücksichtigt werden. Bei der Rechtsform der GmbH war im Verhältnis häufiger ein Jahresergebnis ausgewiesen, was zu der Verzerrung der Stichprobe im Verhältnis zur Grundgesamtheit geführt haben kann.

3.1.2.2 Anzahl der Jahresabschlüsse pro Biogas-Gesellschaft

Im Rahmen der Erhebung wurden Jahresabschlussdaten im Zeitraum 2005 bis 2019 berücksichtigt. Demnach besteht ein Datensatz aus maximal 15 Beobachtungen. Es stehen jedoch nicht für alle 180 untersuchten Biogasanlagen Daten über 15 Jahre zur Verfügung.

Grundsätzlich wurden Datensätze im Rahmen der Erhebung berücksichtigt, die mindestens fünf Beobachtungen im oben genannten Zeitraum aufweisen. Es gibt verschiedene Gründe, warum keine Daten über den gesamten Zeitraum von 15 Jahren vorliegen, beispielhaft sollen die folgenden genannt werden:

- Die Gesellschaft wurde erst nach dem Jahr 2005 gegründet
- Die Gesellschaft wurde vor dem Jahr 2019 liquidiert
- Es ist kein Jahresergebnis ausgewiesen
- Es wurde keine Bilanz veröffentlicht

Die Zeitreihendaten (pro Biogas-Gesellschaft) weisen also mindestens fünf und maximal 15 Beobachtungen auf. Im Mittel liegen 10,76 Jahresabschlüsse pro Biogas-Gesellschaft vor. Das Histogramm in Abbildung 32 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Jahresabschlüsse pro Biogas-Gesellschaft.

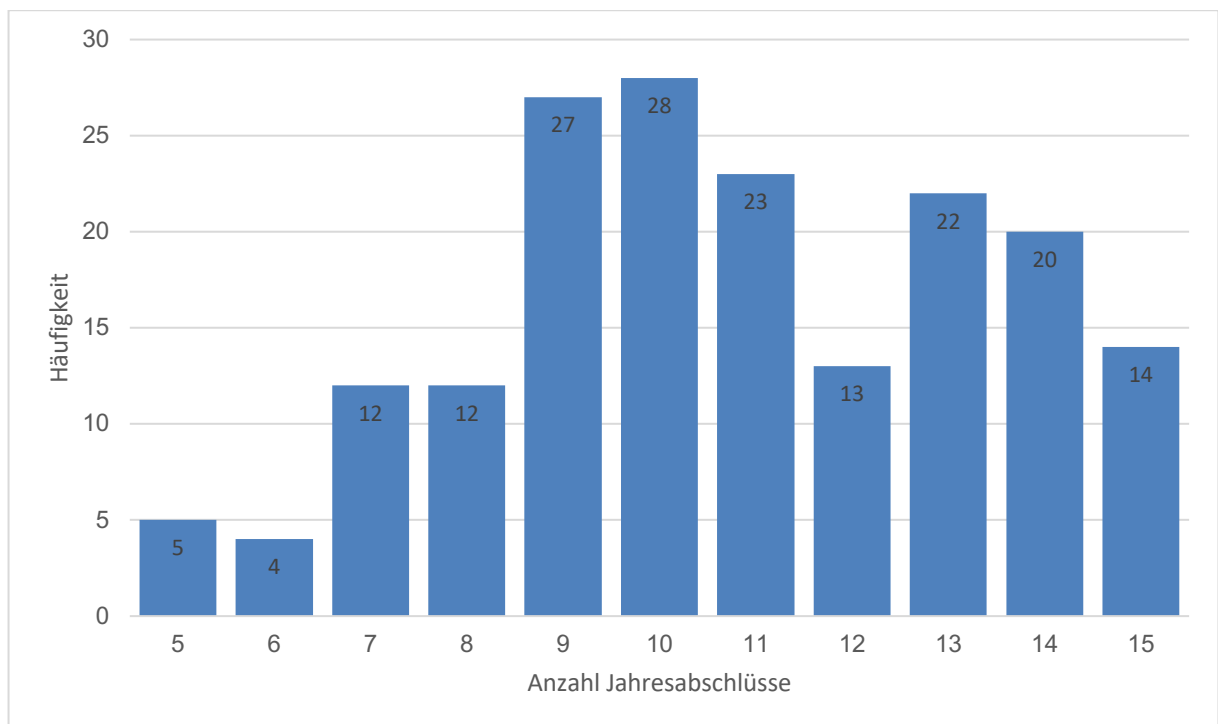


Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung der Anzahl an Jahresabschlüssen pro Biogas-Gesellschaft
Quelle: Eigene Darstellung

3.1.2.3 Geografische Verteilung der Biogasanlagen

Über den Unternehmensnamen lässt sich bei den meisten Biogas-Gesellschaften der Sitz ermitteln. Über die Satelliten-Ansicht bei Google Maps lässt sich überprüfen, ob sich an der eingegebenen Adresse eine Biogasanlage befindet. Die Standorte der einzelnen Biogasanlagen sind auf der Karte in Abbildung 33 markiert.

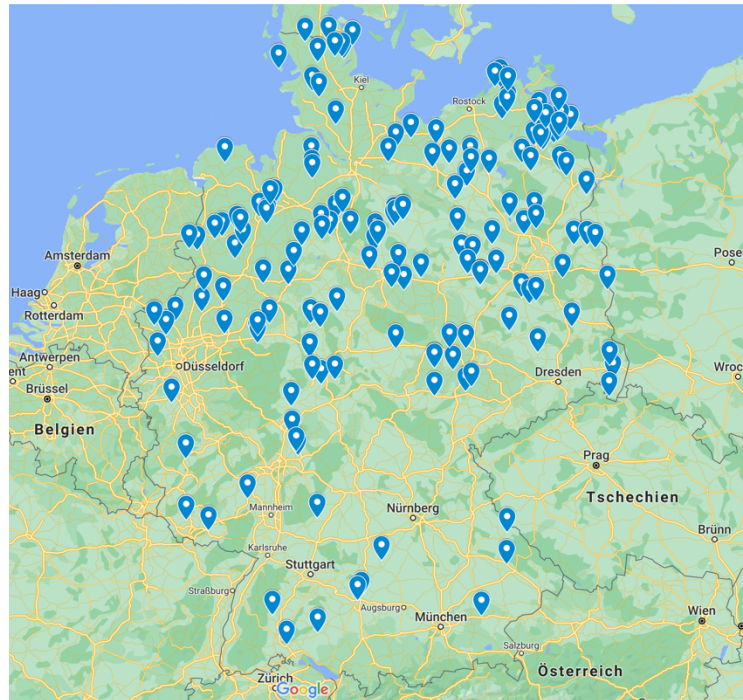


Abbildung 33: Standorte der untersuchten Biogasanlagen
Quelle: Google Maps (2021)

Betrachtet man wie in Kapitel 2.2.1 dargestellt die geografische Verteilung aller Biogasanlagen in Deutschland ist ein Schwerpunkt im Norden und im Süden zu erkennen. Die Biogasanlagen der Stichprobe befinden sich vorwiegend im Norden. Diese Tatsache kann in der Größenstruktur begründet sein. Die Biogasanlagen im Norden sind im Vergleich größer (elektrische Leistung) als die Biogasanlagen im Süden (vgl. Abbildung 15). Die Wahrscheinlichkeit, dass Biogas-Gesellschaften aufgrund ihrer Größe (höhere Bilanzsumme) Jahresabschlussdaten veröffentlichen müssen, ist demnach bei Anlagen im Norden größer. Demnach auch die Wahrscheinlichkeit, dass sie in der Stichprobe enthalten sind.

3.1.2.4 Alter der Biogas-Gesellschaften

Das genaue Gründungsdatum bzw. Alter der Biogas-Gesellschaften ist nicht bekannt. Auf Basis des ersten veröffentlichten Jahresabschlusses im Bundesanzeiger kann auf das Alter geschlossen werden. Abbildung 34 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Biogas-Gesellschaften entsprechend ihres ersten im Bundesanzeiger veröffentlichten Jahresabschlusses.

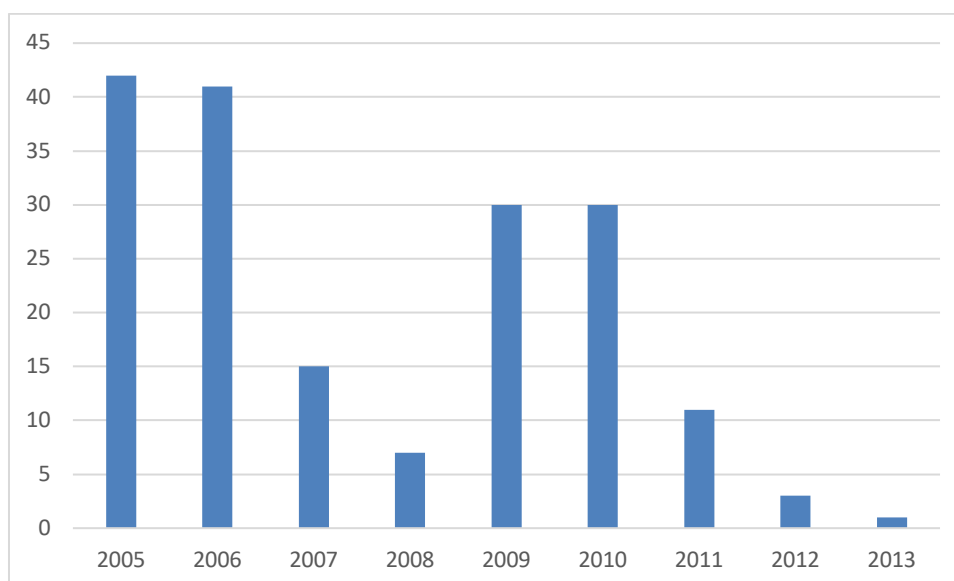


Abbildung 34: Häufigkeitsverteilung der Biogas-Gesellschaften nach "Gründungsjahr" (erster veröffentlichter Jahresabschluss)

Quelle: Eigene Darstellung

3.1.2.5 Bilanzdaten

Die vorliegenden Daten weisen die Struktur von Paneldaten auf. Paneldaten verbinden die zwei Dimensionen eines Querschnitts und einer Zeitreihe: Für mehrere Biogas-Gesellschaften (Querschnitt) liegen Bilanzdaten verschiedener Jahre (Zeitreihe) vor. Die folgende deskriptive Statistik bezieht sich auf die Beobachtungen der einzelnen Bilanzpositionen aller Biogas-Gesellschaften für alle Jahre (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Deskriptive Statistik der Bilanzdaten

	Mittelwert	Stabw.	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Ausstehende Einlagen	4.075	34.795	0	0	0	0	1.125.000	1.937
Anlagevermögen	2.544.072	3.408.867	0	853.998	1.506.957	2.545.319	27.278.497	1.937
Umlaufvermögen	874.418	1.120.745	0	261.737	552.624	976.204	10.092.422	1.937
Aktive RAP	25.107	85.685	-16.310	0	7.380	25.059	1.719.186	1.937
Fehlbetrag/Verlustanteil	190.037	925.350	0	0	0	0	16.379.626	1.937
Summe Aktiva	3.637.671	4.771.345	1.547	1.362.829	2.196.615	3.599.411	37.974.071	1.937
Eigenkapital	482.038	921.929	0	6.363	221.573	650.683	24.024.615	1.937
Sopo mit Rücklagenanteil	9.158	49.656	-4.349	0	0	0	960.633	1.937
Rückstellungen	69.128	197.187	0	4.000	20.236	63.820	5.360.158	1.937
Verbindlichkeiten	3.068.135	4.592.860	0	917.030	1.764.511	2.988.000	37.719.386	1.937
Passive RAP	7.802	32.606	0	0	0	0	315.837	1.937
Passive latente Steuern	1.140	10.308	0	0	0	0	226.223	1.937
Summe Passiva	3.637.380	4.771.401	1.547	1.362.829	2.196.615	3.599.411	37.974.071	1.937

Quelle: Eigene Berechnungen

Ausstehende Einlagen

Vor Inkrafttreten des Bilanzrechtsmodernisierungsgesetzes (BilMoG) im Jahr 2009 bestand die Möglichkeit, die noch nicht eingeforderten ausstehenden Einlagen auf der Aktivseite vor dem Anlagevermögen zu zeigen und das Gezeichnete Kapital ungekürzt auszuweisen (§ 272

Abs. 1 S. 2f. HGB a.F.). Seit dem Inkrafttreten des BilMoG sind noch nicht eingeforderte ausstehende Einlagen auf das Eigenkapital dem Posten „Gezeichnetes Kapital“ offen abzusetzen. Eingeforderte, aber noch nicht eingezahlte Einlagen sind unter den Forderungen gesondert auszuweisen. Daher sind ausstehende Einlagen bei 139 Beobachtungen ausgewiesen.

Anlagevermögen

Das Anlagevermögen ist eine sehr aussagekräftige Größe. Die Herstellungs- bzw. Anschaffungskosten beim Bau oder Erwerb einer Biogasanlage werden im Anlagevermögen unter den Sachanlagen aktiviert und über die Nutzungsdauer abgeschrieben. Die Höhe der Investitionskosten lässt Rückschlüsse auf die Größe bzw. elektrische Leistung der Biogasanlage zu.

Im Jahr 2020 gab es in Deutschland 9.359 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von insgesamt 5.030 MW (Fachverband Biogas e.V., 2023). Das entspricht einer durchschnittlichen Anlagenleistung von 537 kW. Der spezifische Investitionsbedarf einer Biogasanlage mit einer elektrischen Leistung von 500 kW liegt bei 4.572 Euro pro kW (Döhler et al., 2013, S. 288). Die Gesamtinvestition bei einer durchschnittlichen Anlagenleistung von 537 kW beträgt demnach rund 2,5 Mio. Euro.

Der Mittelwert des Anlagevermögens der untersuchten Biogas-Gesellschaften entspricht in etwa diesem Durchschnittswert des Gesamtmarktes. Wobei mit Werten zwischen Null und über 27 Mio. Euro eine große Streuung vorliegt. Ein Wert von Null liegt zum Beispiel dann vor, wenn die Biogas-Gesellschaft bereits gegründet, aber die Anlage noch nicht erworben bzw. gebaut wurde oder wenn die Gesellschaft die Anlage im Rahmen eines Asset-Deals veräußert hat, aber weiterhin besteht. Bei dem Investitionsvolumen von über 27 Mio. Euro handelt es sich um eine sehr große Biogasanlage mit Gasaufbereitung (Biogas Produktion Seelow GmbH).

Um eine Aussage über die Größe der Biogasanlagen in der Stichprobe zu treffen, ist zu berücksichtigen, dass das Anlagevermögen idealtypisch während der Investitionsphase ansteigt und dann durch die Abschreibung von Jahr zu Jahr sinkt. Näherungsweise kann das maximale Anlagevermögen je Biogas-Gesellschaft herangezogen werden (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Maximales Anlagevermögen pro Biogas-Gesellschaft

	Mittelwert	Stabw.	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Anlagevermögen (Max)	3.868.700	4.388.040	279.539	1.577.639	2.383.735	4.126.876	27.278.497	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Umlaufvermögen

Beim Umlaufvermögen handelt es sich, im Gegensatz zum Anlagevermögen, um Vermögensgegenstände bzw. Wirtschaftsgüter, die nicht dazu bestimmt sind, dem Geschäftsbetrieb dauerhaft zu dienen. Beim Betrieb einer Biogasanlage handelt es sich dabei in der Regel um

Substrate wie Silage oder Wirtschaftsdünger, Betriebsstoffe wie Diesel oder Öl, aber auch um Hilfsstoffe wie Siliermittel oder Siloplanen (Stute, 2015, S. 189 f.).

Aktive Rechnungsabgrenzungsposten

Rechnungsabgrenzungsposten sind in § 250 HGB definiert. Bei Rechnungsabgrenzungsposten auf der Aktivseite handelt es sich um Ausgaben vor dem Abschlussstichtag, die Aufwendungen nach dem Stichtag darstellen.

Fehlbetrag/Verlustanteil

Steht diese Position in einer Bilanz, so ist das Eigenkapital bereits „verwendet“ bzw. aufgebraucht. Deswegen steht es in diesem Fall nicht mehr auf der Passivseite (Mittelherkunft), sondern auf der Aktivseite (Mittelverwendung) (Heesen, 2020, S. 21).

Summe Aktiva

Die Bilanzsumme auf der Aktivseite ist die kumulierte Größe aller Vermögensgegenstände.

Eigenkapital

Beim Eigenkapital handelt es sich um die Beträge der Passivseite der Bilanz, die den Anteilseignern zuzuordnen sind (Heesen, 2020, S. 14). Für weitere Berechnungen zum Beispiel der Eigenkapitalquote wird das Eigenkapital mit dem Fehlbetrag/Verlustanteil saldiert. Die deskriptive Statistik des saldierten Eigenkapitals ist Tabelle 13 zu entnehmen.

Tabelle 13: Deskriptive Statistik des saldierten Eigenkapitals der Biogas-Gesellschaften

	Mittelwert	Stabw.	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
EK saldiert	292.001	1.374.602	-16.379.626	6.363	221.573	650.683	24.024.615	1.937

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Eigenkapitalquote gibt den Anteil des Eigenkapitals an der Bilanzsumme an. Die Eigenkapitalquote der Biogas-Gesellschaften entspricht im Mittelwert 20,24% wie der deskriptiven Statistik in Tabelle 14 zu entnehmen ist. Im Umkehrschluss dazu liegt der Fremdkapitalanteil im Mittel bei rund 80%.

Tabelle 14: Deskriptive Statistik der Eigenkapitalquoten der Biogas-Gesellschaften

	Mittelwert	Stabw.	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Eigenkapitalquote	20,24%	23,93%	0,00%	0,54%	12,62%	29,11%	100,00%	1.937

Quelle: Eigene Berechnungen

Sonderposten mit Rücklagenanteil

Ein Sonderposten mit Rücklagenanteil kommt lediglich bei 134 Datensätzen vor. Auch hier hat sich die Gesetzeslage mit dem BilMog geändert. Vor Inkrafttreten des BilMog wurden unter

dieser Bilanzposition in der Regel Subventionen oder steuerbegünstigte Ansparrücklagen gebucht (Heesen, 2020, S. 16).

Rückstellungen

Wenn Eventualverbindlichkeiten, die dem Grunde nach, des Auszahlungszeitpunktes oder der Höhe noch nicht bekannt sind, spricht man von Rückstellungen. Diese werden zum Beispiel als Rückstellungen vor Pensionen, Steuerrückstellungen oder sonstige Rückstellungen gebildet (Heesen, 2020, S. 17).

Verbindlichkeiten

Den größten Anteil an der Bilanzsumme auf der Passivseite machen die Verbindlichkeiten aus. Besondere Relevanz bei Projektgesellschaften haben hier die Verbindlichkeiten gegenüber Kreditinstituten, die im Rahmen der Projektfinanzierung Fremdkapital zur Verfügung gestellt haben. Außerdem werden unter den Verbindlichkeiten auch diese aus Lieferungen und Leistungen subsumiert.

Passive Rechnungsabgrenzungsposten

Rechnungsabgrenzungsposten sind in § 250 HGB definiert. Bei Rechnungsabgrenzungsposten auf der Passivseite handelt es sich um Einnahmen vor dem Abschlussstichtag, die Erträge nach dem Stichtag darstellen.

Passive latente Steuern

Passive latente Steuern sind lediglich in 56 Datensätzen ausgewiesen. Sie entstehen gemäß § 274 HGB bei Differenzen zwischen handelsrechtlichen und steuerrechtlichen Wertansätzen.

Summe Passiva

Die Bilanzsumme auf der Passivseite ist die kumulierte Größe des zur Verfügung gestellten Kapitals. Die Bilanzsumme auf der Aktivseite und auf der Passivseite sind per Definition identisch. Die geringen Abweichungen gemäß Tabelle 11 resultieren aus fehlerhaft veröffentlichten Daten im Bundesanzeiger.

3.1.2.6 Erfolgskennzahlen

Nachdem die Bilanzdaten in einer deskriptiven Statistik zusammengefasst wurden, werden im Folgenden die Erfolgskennzahlen Jahresergebnis, Eigenkapitalrendite und Gesamtkapitalrendite in der Zeitreihe dargestellt.

Jahresergebnis

In Tabelle 15 ist die deskriptive Statistik der Jahresergebnisse der Biogas-Gesellschaften in der Zeitreihe ausgewiesen. Ein Jahresüberschuss bzw. Fehlbetrag ergibt sich aus der

Differenz sämtlicher Erträge und Aufwendungen und beschreibt damit den Gewinn bzw. Verlust des Geschäftsjahres (Wöhe & Döring, 2020, S. 716).

Tabelle 15: Deskriptive Statistik der Jahresergebnisse der Biogas-Gesellschaften

	Mittelwert	Stabw	Min	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Max	N
2005	-67.428	304.567	-1.478.353	-134.656	-40.304	-9.958	7.937	65.980	191.727	25
2006	-54.245	136.042	-732.466	-201.014	-101.944	-14.315	-240	22.882	245.038	67
2007	-69.634	183.149	-729.822	-361.033	-125.991	-8.115	30.414	90.597	210.947	87
2008	-72.039	271.196	-2.268.928	-198.378	-130.092	-4.233	20.928	80.774	312.079	97
2009	-4.082	201.692	-1.492.187	-102.467	-35.460	-1.024	73.909	170.979	516.000	129
2010	12.058	156.951	-833.437	-126.600	-22.287	646	66.723	160.517	519.472	149
2011	-22.463	257.843	-2.283.850	-188.894	-63.355	232	77.304	147.116	726.658	167
2012	-9.015	388.932	-3.398.648	-247.866	-34.031	38.169	143.794	237.796	922.028	165
2013	14.479	330.487	-1.877.863	-201.308	-31.314	57.154	160.415	303.546	699.589	158
2014	-97.600	800.614	-6.399.129	-237.943	-26.516	45.586	126.441	245.487	788.601	165
2015	63.453	270.530	-1.319.298	-119.526	2.948	77.696	149.097	263.052	1.218.746	158
2016	-52.762	599.039	-3.374.645	-196.512	-3.506	68.226	152.405	256.138	765.191	150
2017	-28.755	479.769	-2.528.389	-328.762	-17.045	62.336	181.251	258.695	892.778	152
2018	-10.707	521.080	-3.774.447	-263.007	-7.123	72.938	169.285	235.848	1.059.389	142
2019	112.754	1.293.628	-4.807.400	-133.855	2.671	76.444	217.746	369.106	12.134.101	126

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 35 zeigt ebenfalls die deskriptive Statistik der Jahresergebnisse der Biogas-Gesellschaften in der Zeitreihe als Liniendiagramm.

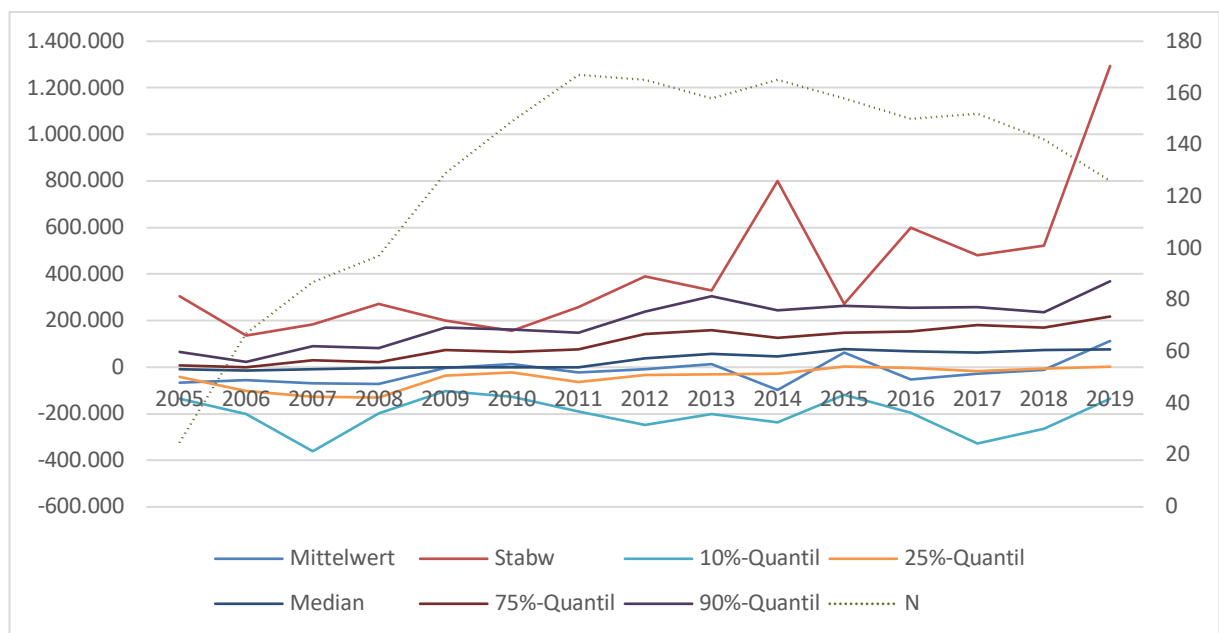


Abbildung 35: Deskriptive Statistik der Jahresergebnisse der Biogas-Gesellschaften

Quelle: Eigene Darstellung

Beim Jahresergebnis handelt es sich um eine absolute Kennzahl. Das Jahresergebnis beschreibt den Gewinn oder den Verlust, den eine Biogas-Gesellschaft innerhalb eines Jahres erzielt. Die Unterschiede in der Höhe der Jahresergebnisse können verschiedene Ursachen haben. Ohne weitere Informationen ist das Jahresergebnis als absolute Kennzahl für Vergleiche ungeeignet und besitzt isoliert betrachtet wenig Aussagekraft. Mehr Aussagekraft erhält

die absolute Erfolgsgröße Jahresergebnis, wenn Sie im Verhältnis zum eingesetzten Kapital betrachtet wird, wie es z.B. bei der Eigenkapital- oder Gesamtkapitalrendite der Fall ist.

Eigenkapitalrendite

Zur Berechnung der Eigenkapitalrendite wird die absolute Erfolgsgröße Jahresergebnis in Beziehung zur Basisgröße Eigenkapital gesetzt (Wöhe & Döring, 2020, S. 39):

$$\text{Eigenkapitalrendite} = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Eigenkapital}} [\%]$$

Bei der Eigenkapitalrendite entspricht das Eigenkapital dem eingesetzten Geldbetrag, während das Jahresergebnis mit dem Anlageergebnis gleichzusetzen ist. Für Investoren stellt die Eigenkapitalrendite eine der wichtigsten Kennzahlen dar. Die Eigenkapitalrendite kann durch vermehrten Einsatz von Fremdkapital – unter günstigen Bedingungen – erhöht werden. Diese Hebelwirkung des Fremdkapitals auf die Eigenkapitalrendite ist unter dem Begriff Leverage-Effekt bekannt (Wöhe & Döring, 2020, S. 600). Die Eigenkapitalrendite kann nur ermittelt werden, wenn das Eigenkapital positiv ist. In Tabelle 16 ist die deskriptive Statistik der Eigenkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften in der Zeitreihe ausgewiesen.

Tabelle 16: Deskriptive Statistik der Eigenkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften

	Mittelwert	Stabw	Min	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Max	N
2005	-25,24%	160,18%	-355,09%	-225,02%	-47,91%	-4,16%	-1,48%	117,09%	321,93%	16
2006	-215,68%	925,82%	-6556,37%	-312,37%	-99,94%	-15,92%	-0,85%	61,26%	142,57%	52
2007	-39,41%	271,16%	-1293,80%	-104,94%	-37,83%	-0,10%	56,41%	98,02%	433,96%	53
2008	-6,40%	115,98%	-356,05%	-118,35%	-31,74%	2,08%	37,10%	64,95%	536,69%	56
2009	2,32%	138,66%	-676,91%	-62,35%	-8,36%	2,95%	50,55%	78,05%	415,35%	84
2010	-719,10%	7641,97%	-81213,95%	-84,97%	-10,14%	5,23%	39,46%	70,14%	703,91%	113
2011	-133,22%	1507,02%	-16709,05%	-44,51%	-18,89%	6,86%	37,33%	59,16%	846,60%	124
2012	154,46%	1014,44%	-614,51%	-45,80%	-6,02%	18,39%	42,59%	82,25%	9455,84%	133
2013	1,48%	105,86%	-650,12%	-24,29%	1,07%	15,73%	37,26%	62,62%	133,50%	124
2014	-90,92%	1379,05%	-15835,25%	-18,91%	1,97%	15,83%	30,86%	89,33%	623,74%	133
2015	24,94%	57,81%	-156,69%	-10,81%	4,66%	17,22%	30,87%	68,98%	449,65%	131
2016	-21,62%	577,41%	-6142,32%	-10,04%	4,64%	14,09%	24,08%	45,90%	1464,34%	121
2017	240,05%	2795,71%	-3850,28%	-4,62%	3,53%	14,03%	30,75%	42,77%	30493,72%	121
2018	-150,88%	1841,04%	-19975,86%	-6,63%	4,73%	13,88%	22,45%	42,96%	287,78%	118
2019	13,68%	27,97%	-104,25%	-16,40%	1,86%	10,67%	26,96%	41,47%	121,78%	109

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 36 zeigt ebenfalls die deskriptive Statistik der Eigenkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften in der Zeitreihe als Liniendiagramm.

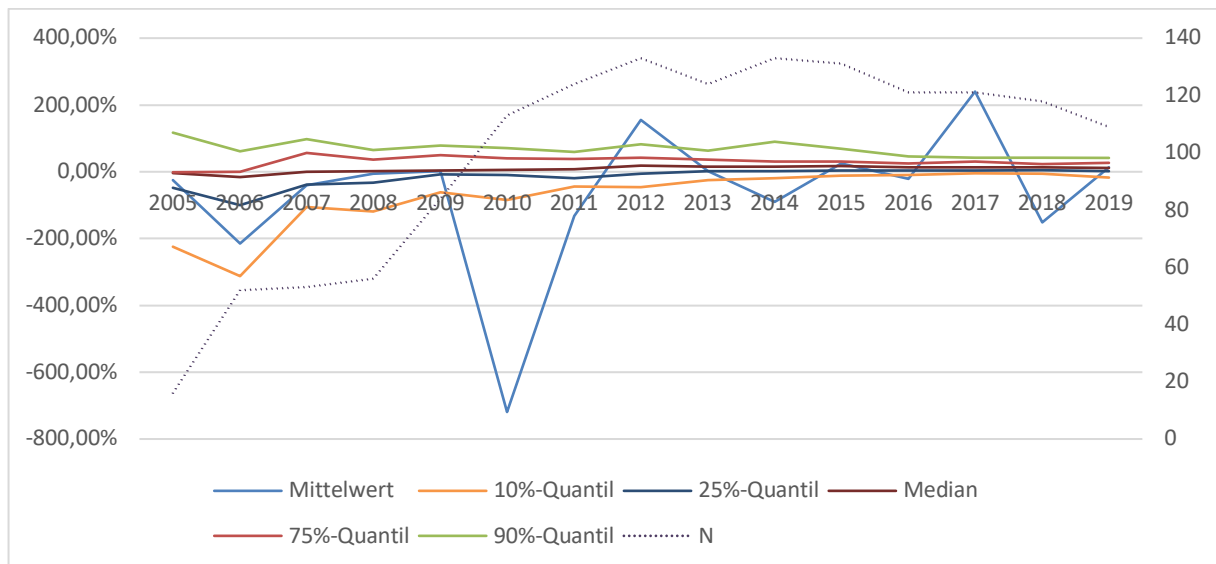


Abbildung 36: Deskriptive Statistik der Eigenkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften
Quelle: Eigene Darstellung

Die Eigenkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften weisen im Mittel in der Zeitreihe extreme Schwankungen auf. Das liegt zum Beispiel an unterschiedlichen Eigenkapitalquoten und dem damit verbundenen Leverage-Effekt. Hinzu kommt, dass Biogasanlagen neben dem Eigen- und Fremdkapital mit Mezzaninkapital finanziert sein können. Dem entsprechend ist es möglich, dass Gesellschafter neben echtem Eigenkapital zusätzlich Gesellschafterdarlehen einbringen, die mit einem qualifizierten Rangrücktritt ausgestattet sind. Diese Gesellschafterdarlehen sind in der Bilanz unter dem Fremdkapital ausgewiesen, werden aber wie Eigenkapital behandelt.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass ein rechnerisch bzw. bilanziell negatives Eigenkapital als „nicht durch Eigenkapital gedeckter Fehlbetrag“ auf der Aktivseite ausgewiesen wird. Dem entsprechend kann das Eigenkapital auf der Passivseite im Minimum Null betragen. In diesem Fall kann keine Eigenkapitalrendite berechnet werden, da das Jahresergebnis durch Null geteilt werden müsste. Würde man alternativ durch das negative Eigenkapital teilen, erhält man im Falle eines positiven Jahresergebnisses (Gewinn) eine negative Eigenkapitalrendite. Im Falle eines Verlustes und eines negativen Eigenkapitals erhielt man eine positive Eigenkapitalrendite, was den Sachverhalt nicht richtig darstellen würde.

Gesamtkapitalrendite

In der einschlägigen Literatur wird die Gesamtkapitalrentabilität regelmäßig mit folgender Formel definiert:

$$\text{Gesamtkapitalrentabilität} = \frac{\text{Gewinn} + \text{Fremdkapitalzinsen}}{\text{Eigenkapital} + \text{Fremdkapital}} [\%]$$

Der Gewinn spiegelt die Vergütung des Eigenkapitals wider. Die Fremdkapitalzinsen wurden zuvor in der GuV bei der Gewinnermittlung abgezogen und werden hier wieder hinzuaddiert, da sie die Vergütung des Fremdkapitals darstellen.

Schierenbeck (2000, S. 64 f.) unterscheidet die Brutto-Gesamtkapitalrentabilität und die Netto-Gesamtkapitalrentabilität. „Brutto“ und „netto“ deutet dabei die Unterscheidung der Erfolgsgrößen vor und nach Abzug der Fremdkapitalzinsen an. Die Netto-Gesamtkapitalrentabilität ist demzufolge definiert als das Verhältnis von Reingewinn zu Gesamtkapital:

$$GKR_{netto} = \frac{\text{Reingewinn}}{\text{Gesamtkapital}} [\%]$$

Der Reingewinn entspricht dabei dem Jahresergebnis nach Zinsen und Steuern. Dieser Definition folgend wird die Netto-Gesamtkapitalrendite der Biogas-Gesellschaften als Renditekennzahl herangezogen. Sie entspricht dem Quotienten aus Jahresergebnis und Bilanzsumme. Die Bilanzsumme entspricht auf der Passivseite der Summe aus Eigen- und Fremdkapital. Heesen (2020, S. 204) definiert die Gesamtkapitalrendite ebenfalls als Maß für die Profitabilität des eingesetzten Kapitals und ermittelt diese als Quotient aus Jahresüberschuss und Bilanzsumme. In Tabelle 17 ist die deskriptive Statistik der Gesamtkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften in der Zeitreihe ausgewiesen.

Tabelle 17: Deskriptive Statistik der Gesamtkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften

	Mittelwert	Stabw	Min	10%-Quantil	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	90%-Quantil	Max	N
2005	-2,46%	7,74%	-27,61%	-11,27%	-2,88%	-1,64%	0,69%	5,22%	11,26%	25
2006	-4,29%	7,93%	-24,76%	-17,16%	-6,64%	-1,84%	-0,11%	2,76%	12,77%	67
2007	-3,16%	9,67%	-25,22%	-18,43%	-6,70%	-2,36%	1,89%	4,65%	43,93%	87
2008	-2,40%	8,63%	-30,16%	-10,96%	-7,00%	-0,75%	1,64%	4,97%	25,46%	97
2009	0,08%	8,74%	-29,35%	-10,25%	-3,00%	-0,35%	4,06%	12,27%	28,95%	129
2010	0,34%	7,81%	-25,45%	-6,83%	-2,54%	0,05%	3,70%	7,92%	28,78%	149
2011	0,99%	7,90%	-23,73%	-5,75%	-2,50%	0,01%	3,01%	9,74%	46,81%	167
2012	1,78%	7,63%	-23,14%	-5,49%	-1,47%	1,60%	6,25%	9,75%	30,67%	165
2013	3,05%	8,84%	-17,75%	-6,15%	-1,01%	1,78%	5,96%	12,79%	47,40%	158
2014	1,56%	8,70%	-30,24%	-6,58%	-1,42%	1,69%	4,45%	11,99%	29,44%	165
2015	2,89%	8,77%	-45,84%	-3,23%	0,08%	2,61%	6,96%	10,88%	37,17%	158
2016	2,99%	10,63%	-49,28%	-7,11%	-0,07%	2,51%	6,32%	13,19%	60,87%	150
2017	3,27%	9,14%	-47,56%	-4,63%	-0,90%	3,20%	8,48%	13,23%	27,09%	152
2018	3,78%	7,60%	-12,66%	-5,88%	-0,43%	3,14%	7,90%	13,45%	34,04%	142
2019	4,35%	12,25%	-47,94%	-4,74%	0,26%	2,69%	9,28%	16,76%	60,73%	126

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 37 zeigt ebenfalls die deskriptive Statistik der Eigenkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften in der Zeitreihe als Liniendiagramm.

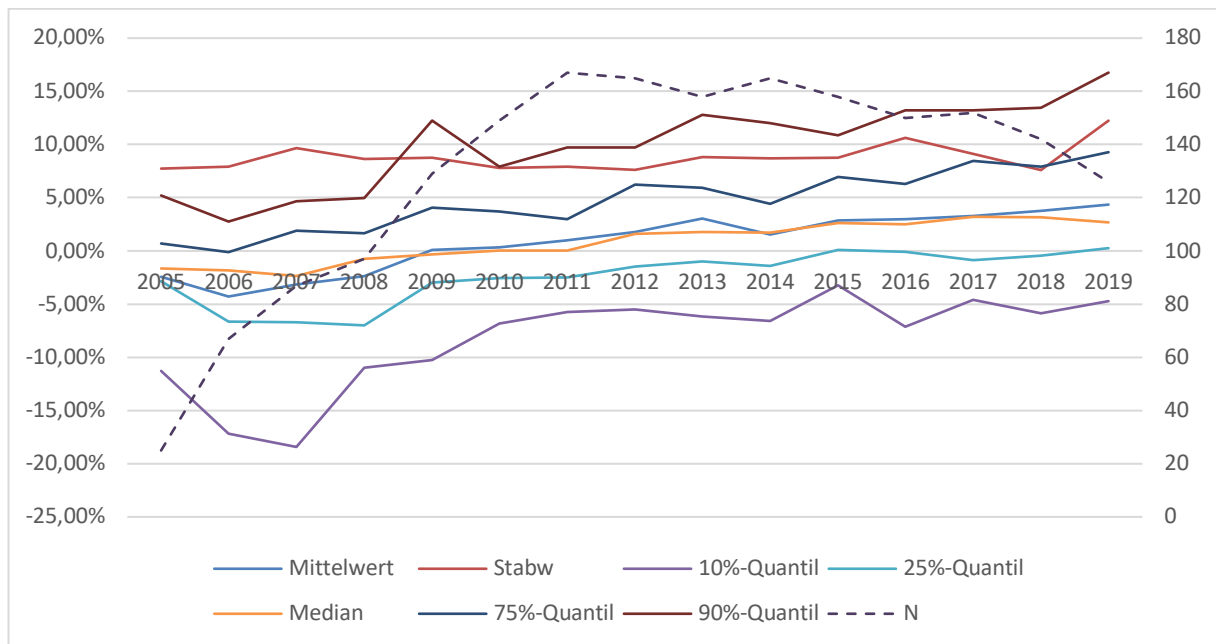


Abbildung 37: Deskriptive Statistik der Gesamtkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften
Quelle: Eigene Darstellung

Im Gegensatz zur absoluten Erfolgsgröße Jahresergebnis, handelt es sich bei der Netto-Gesamtkapitalrendite um eine relative Kennzahl. Die Netto-Gesamtkapitalrendite berücksichtigt gleichermaßen das Eigenkapital und das Fremdkapital, das der Biogas-Gesellschaft zur Verfügung steht und wird demnach nicht durch unterschiedliche Eigenkapitalquoten und den Leverage-Effekt beeinflusst. Entsprechend der Definition der Rendite stellt das Jahresergebnis das Anlageergebnis dar, während das Eigen- und Fremdkapital bzw. die Bilanzsumme mit dem eingesetzten Geldbetrag gleichzusetzen sind.

3.2 Methode

3.2.1 Schätzung der Parameter für die Portfolioanalyse

3.2.1.1 Stichprobenverteilung und Erwartungswert der Renditen

Im vorstehenden Kapitel wurden drei Erfolgskennzahlen der Biogas-Gesellschaften in der Zeitreihe dargestellt:

- Jahresergebnis
- Eigenkapitalrendite
- Netto-Gesamtkapitalrendite

Zunächst wird begründet, welche dieser Kennzahlen im Folgenden die Grundlage für die Erwartungsbildung der Rendite darstellen soll. Anschließend wird beschrieben, wie die Stichprobenverteilung ermittelt und mit welcher Formel der Erwartungswert berechnet wird. Dieser fließt als Parameter in die Portfolioanalyse ein.

Wie in Kapitel 2.1.2.1 beschrieben, definiert der Begriff „Rendite“ das Anlageergebnis in Relation zum eingesetzten Geldbetrag. Das Jahresergebnis als absolute Erfolgskennzahl eignet sich demnach nur bedingt zur Einschätzung der Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens. Die Ursache liegt in der fehlenden Möglichkeit, gleichzeitig den Bezug zur hiermit in Verbindung stehenden Einflussgröße, dem Mitteleinsatz, herzustellen (Bestmann, 2011, S. 25).

Die Eigenkapitalrendite stellt für Investoren eine wichtige Kennzahl dar und wird sowohl in der Agrarökonomie als auch im Rahmen der Portfolioanalyse regelmäßig als Renditekennzahl verwendet. Aufgrund der Datenbasis und der daraus resultierenden mangelnden Vergleichbarkeit durch einen möglichen Leverage-Effekt, die Intransparenz möglicher Gesellschafterdarlehen und die beschriebenen Fälle, bei denen die Berechnung der Eigenkapitalrendite nicht möglich oder sinnvoll ist, wird diese Renditekennzahl dennoch im Rahmen dieser Arbeit nicht als Parameter für die Portfolioanalyse herangezogen.

Im Mittelpunkt steht die Frage, inwiefern eine Biogas-Gesellschaft in der Lage ist mit dem ihm zur Verfügung stehenden Gesamtkapital Gewinne zu erwirtschaften, sodass für die folgende Analyse die Netto-Gesamtkapitalrendite als Renditekennzahl verwendet wird.

Wie in Kapitel 2.1.3 beschrieben, ist es eine grundlegende Annahme der Portfoliotheorie, dass die Renditen an Kapitalmärkten der Normalverteilung folgen. Diese vereinfachende Annahme der Portfoliotheorie wird häufig kritisiert, da sie im Falle von Wertpapieren empirisch nicht haltbar ist. Die Folge ist, dass die Wahrscheinlichkeitsverteilung nicht vollständig mit den ersten beiden Momenten (Erwartungswert und Standardabweichung) beschrieben werden kann (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 13). Wird diese Tatsache ignoriert, kann es im schlechtesten Fall sein, dass in Abhängigkeit von der Verteilung mögliche Verluste unterschätzt und mögliche Gewinne überschätzt werden (Ruppert & Matteson, 2015, S. 87).

Bevor das Modell zur Portfolioauswahl für Investitionen in Biogasanlagen bzw. Biogas-Gesellschaften angewandt werden kann, ist demnach zu prüfen, ob deren Renditen normalverteilt sind. Nur wenn Normalverteilung vorliegt, lassen sich die Renditen vollständig durch die ersten beiden Momente der Wahrscheinlichkeitsverteilung beschreiben. Die Stichprobe umfasst 180 Biogasanlagen, für die zwischen fünf und 15 Renditebeobachtungen vorliegen, die auf Normalverteilung zu testen sind. Der Shapiro-Wilk-Test ist ein statistischer Signifikanztest der auf Normalverteilung geeicht und durch eine hohe Teststärke besonders bei kleinen Stichproben ($3 \leq n \leq 50$) gekennzeichnet ist (Falk et al., 2014, S. 106). Die Teststatistik W setzt die Stichprobenvarianz (s^2) ins Verhältnis zur erwarteten Varianz einer normalverteilten Grundgesamtheit/Stichprobe (b^2):

$$W = \frac{b^2}{(n-1)s^2}$$

Je weniger die Stichprobenvarianz von der erwarteten Varianz der Referenzverteilung abweicht, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Grundgesamtheit der Stichprobe normalverteilt ist. Es gilt $W \leq 1$ und je näher W am Wert 1 liegt, desto mehr gleichen sich die beiden Varianz-Schätzer, was ein Zeichen für Normalverteilung der Stichprobe ist. Der Wert der Teststatistik W wird mit einem kritischen Wert p für einen gegebenen Stichprobenumfang n und dem zuvor festgelegten Signifikanzniveau α verglichen (Falk et al., 2014, S. 106).

Die Nullhypothese besagt, dass die Verteilung F der Renditen der Biogas-Gesellschaften normalverteilt (F_0) sind, während die Alternativhypothese davon ausgeht, dass die Renditen der Biogas-Gesellschaften nicht der Normalverteilung folgen. Das Signifikanzniveau α soll 5% betragen:

$$H_0 : F = F_0$$

$$H_1 : F \neq F_0$$

$$\alpha = 5\%$$

Das Signifikanzniveau α beschreibt die Wahrscheinlichkeit einen Fehler 1. Art zu begehen. Bei einem Fehler 1. Art wird die Nullhypothese verworfen, obwohl sie richtig ist. Da die Renditen von 180 Biogas-Gesellschaften auf Normalverteilung getestet werden, beträgt die Wahrscheinlichkeit (mindestens einmal) einen Fehler 1. Art zu begehen nicht mehr 5%, sondern 99,99% beträgt (Abdi, 2007):

$$\alpha_{gesamt} = 1 - (1 - 0,05)^{180} = 0,9999 = 99,99\%$$

Da die Wahrscheinlichkeit einen Fehler 1. Art zu begehen insgesamt nicht mehr als 5% betragen soll, wird das Signifikanzniveau korrigiert. Die Bonferroni-Korrektur ist ein Verfahren, mit dessen Hilfe die Alphafehler-Kumulierung beim multiplen Testen neutralisiert wird, indem der p-Wert adjustiert wird (Abdi, 2007):

$$p^* < \frac{\alpha}{n}$$

$$p^* < \frac{0,05}{180}$$

$$p^* < 0,00027778$$

Auf Basis der erhobenen Bilanzdaten wurden die historischen Netto-Gesamtkapitalrenditen der in der Stichprobe enthaltenen Biogas-Gesellschaften berechnet. Für die Portfolioanalyse interessieren jedoch die zukünftigen Renditen der Biogas-Gesellschaften. Diese sind unsicher und müssen geschätzt werden.

Der Argumentation von Markowitz (1952) folgend wird für jede Biogas-Gesellschaft der Mittelwert der historischen Renditen als Schätzer für den Erwartungswert herangezogen, um einen Prognosewert für den weiteren Verlauf in der Zukunft zu ermitteln:

$$E(R_i) = \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i$$

Die Ergebnisse werden in einer deskriptiven Statistik dargestellt.

3.2.1.2 Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk als alternative Risikomaße

Standardabweichung

Neben dem Mittelwert historischer Renditen als Prognosewert für die Zukunft definiert Markowitz (1952) das Risiko als die Streuung der Renditen um diesen Mittelwert. Das Risiko quantifiziert Markowitz demnach mit den Streuungsmaßen Varianz bzw. Standardabweichung. Der Mittelwert historischer Netto-Gesamtkapitalrenditen der Biogas-Gesellschaften stellt den Erwartungswert für die Zukunft dar und das erwartete Risiko lässt sich mit Hilfe der Varianz bzw. der Standardabweichung schätzen. Die Standardabweichung hat gegenüber der Varianz den Vorteil, dass Sie in der gleichen Einheit gemessen wird wie die beobachteten Messwerte. Die historische Renditestreuung der Biogas-Gesellschaften wird mit der Formel für die Stichprobenvarianz geschätzt und dient ebenfalls als Prognosewert für die Zukunft. Die Formel für das Streuungs- bzw. Risikomaß Standardabweichung σ ist, wie in Kapitel 2.1.2.2 beschrieben, definiert als die Quadratwurzel der Stichprobenvarianz σ^2 :

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - \mu)^2}$$

Bei der Varianz handelt es sich um ein symmetrisches Risikomaß. Die Abweichungen der Messwerte vom Mittelwert nach oben und nach unten werden gleichermaßen berücksichtigt. Insbesondere im Zusammenhang mit Investitionen sind es vor allem negative Abweichungen vom erwarteten Wert, die es zu vermeiden gilt. Deshalb werden alternativ zum symmetrischen Risikomaß Standardabweichung der Value at Risk und der Conditional Value at Risk als Downside Risikomaße geschätzt. Die genannten alternativen Risikomaße finden sowohl im Portfoliomanagement als auch in der Agrarökonomie regelmäßig Anwendung.

Value at Risk und Conditional Value at Risk

Der Value at Risk beschreibt den maximal zu erwartenden Verlust, der mit der Wahrscheinlichkeit $1 - \alpha$ innerhalb einer Halteperiode, unter den üblichen Marktbedingungen, nicht überschritten wird (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 31):

$$VaR_{\alpha}(x) = -\mu + Z_{\alpha} \cdot \sigma(x)$$

Wobei Z_{α} das α -Quantil der Standardnormalverteilung darstellt. Demnach hält die Formel nur, wenn normalverteilte Renditen vorliegen. Der Quantilwert soll 5% ($\alpha=0,05$) betragen. Das entspricht einem Wert von 1,6449 für Z_{α} .

Der Conditional Value at Risk stellt eine Weiterentwicklung des Value at Risk dar und berücksichtigt nicht nur die Verlustwahrscheinlichkeit, sondern auch die Verlusthöhe. Der Conditional Value at Risk definiert den erwarteten Verlust für den Fall, dass der Value at Risk überschritten wird. Er gibt den wahrscheinlichkeitsgewichteten Durchschnitt der Verluste an, die oberhalb des Quantils zum Niveau α liegen (Bruns & Meyer-Bullerdiel, 2013, S. 40):

$$CVaR_{\alpha}(x) = -\mu + \frac{\varphi(Z_{1-\alpha})}{\alpha} \sigma(x)$$

Wobei die Dichtefunktion der Normalverteilung angenommen wird, die gegeben ist durch:

$$\varphi(Z_{1-\alpha}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}(Z_{1-\alpha})^2}$$

Es werden demnach nur Verlustfälle betrachtet, die über den Value at Risk hinaus gehen. Das Signifikanzniveau soll wie beim Value at Risk 5% ($\alpha=0,05$) betragen. Der Wert der Dichtefunktion beträgt dann 0,1031.

Für jede Biogas-Gesellschaft werden die drei Risikomaße Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk auf Basis der historischen Netto-Gesamtkapitalrenditen berechnet und in einer deskriptiven Statistik dargestellt.

3.2.1.3 Schätzung der Kovarianz- und Korrelationsmatrix

3.2.1.3.1 Formeln für Stichprobenkovarianz und -korrelation

Der Portfolioeffekt basiert darauf, dass das Risiko eines Portfolios kleiner ist als die Summe der mit Ihren Portfolioanteilen gewichteten Risiken der Einzelwerte. Für die Portfoliooptimierung spielen nicht nur die Rendite und das Risiko der Einzelanlage eine Rolle, sondern auch die Kovarianz der Renditen zwischen zwei Anlagen. Die Kovarianz beschreibt den Zusammenhang zwischen zwei Variablen und lässt sich mit folgender Formel für Stichproben schätzen (Spremann, 2008, S. 81):

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Die Kovarianz misst die lineare Beziehung zwischen zwei Variablen. Kovarianzwerte sind nicht standardisiert. Daher kann die Kovarianz von der negativen Unendlichkeit bis zur positiven Unendlichkeit reichen. Der Wert für eine perfekte lineare Beziehung hängt von den Daten ab.

Wenn die Daten nicht standardisiert sind, ist es schwierig, die Stärke der Beziehungen zwischen den Variablen zu ermitteln.

Die Korrelation dagegen ist eine Funktion der Kovarianz und ist standardisiert. Der Korrelationskoeffizient kann einen Wert zwischen -1 und $+1$ annehmen. Je größer der Absolutwert des Koeffizienten, desto stärker ist die Beziehung zwischen den Variablen. Bei der Pearson-Korrelation gibt ein Wert von $+1$ oder -1 eine perfekte lineare Beziehung an. Eine Korrelation nahe null gibt an, dass keine lineare Beziehung zwischen den Variablen vorliegt. Das Vorzeichen des Koeffizienten gibt die Richtung der Beziehung an. Mit der Korrelation wird sowohl die Stärke als auch die Richtung der linearen Beziehung zwischen zwei Variablen gemessen (Spremann, 2008, S. 81):

$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Da es sich bei den Renditen der 180 Biogas-Gesellschaften dieser Arbeit um mehrdimensionale Zufallsvariablen handelt, werden die Werte der Kovarianzschätzung als auch die der Korrelationskoeffizienten jeweils in einer Matrix dargestellt.

3.2.1.3.2 Umgang mit fehlenden historischen Renditewerten: Pairwise deletion

Die Kovarianz bzw. die Korrelation der historischen Renditen zweier Biogas-Gesellschaften kann mit den oben dargestellten Formeln nur geschätzt werden, wenn sich die Zeitreihendaten überschneiden. Der Beobachtungszeitraum der Jahresabschlussdaten beginnt, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, im Jahr 2005 und endet im Jahr 2019. Es konnten jedoch nicht für jede Biogas-Gesellschaft Jahresabschlussdaten über den gesamten Zeitraum von 15 Jahren erhoben werden. Im Rahmen der Datenerhebung wurden Biogas-Gesellschaften berücksichtigt, die eine Mindestanzahl von fünf auswertbaren Jahresabschlüssen aufweisen. Dementsprechend liegen Datensätze vor, die mit 15 auswertbaren Jahresabschlüssen vollständig sind und andere bei denen bis zu zehn Werte fehlen.

Die Literatur hält verschiedene Methoden bereit, wie mit dem Problem „fehlender Werte“ (missing values) umgegangen werden kann. Neben Verfahren wie fehlende Werte geschätzt und ersetzt werden können, werden die Methoden „listwise deletion“ und „pairwise deletion“ beschrieben (Peugh & Enders, 2004). Bei der Methode „listwise deletion“ werden Datensätze, die fehlende Werte aufweisen, gelöscht. Das Histogramm in Kapitel 3.1.2.2 zeigt, dass nur 14 der 180 Biogas-Gesellschaften die maximale Anzahl von 15 Renditebeobachtungen aufweisen. Bei Anwendung der Methode „listwise deletion“ würden 166 unvollständige Datensätze gelöscht. Nur 14 Biogas-Gesellschaften würden im Rahmen der Portfoliooptimierung berücksichtigt werden. Da möglichst viele Beobachtungen in die Analyse eingehen sollen, wird diese Methode nicht verwendet.

Eine alternative Methode, die häufig beschrieben wird, ist „pairwise Deletion“, also der paarweise Ausschluss fehlender Werte. Im Falle fehlender Werte, werden für die zu berechnende Statistik alle übrigen vorliegenden Werte verwendet. Die Berechnung der Kovarianzmatrix erfolgt auf Basis unterschiedlicher Teilstichproben. Diese entstehen durch paarweise Beobachtungen, die sich in der Zeitreihe überschneiden. Wenn von einer Biogas-Gesellschaft Jahresabschlussdaten für die Jahre 2005 bis 2014 und von einer andere Biogas-Gesellschaft von 2010 bis 2019 vorliegen, dann überschneiden sich die Daten im Zeitraum von 2010 bis 2014. Es liegen fünf paarweise Beobachtungen vor und die Kovarianz kann auf Basis dieser Teilstichprobe geschätzt werden.

Gemäß dem Gesetz der großen Zahl (Bamberg et al., 2017, S. 121 f.) hat die Größe der Teilstichprobe Einfluss auf die Schätzgüte der Kovarianzen. Je kleiner die (Teil-)Stichprobe ausfällt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass durch Schätzfehler extreme Kovarianzwerte ermittelt werden. Um den Einfluss der Teilstichprobengröße auf das Vorkommen von Extremwerten zu untersuchen, wird bei der deskriptiven Statistik der Kovarianzen und Korrelationen unterschieden, ob der Schätzung mindestens zwei paarweise Beobachtungen, mindestens fünf paarweise Beobachtungen oder mindestens zehn paarweise Beobachtungen zugrunde liegen.

3.2.1.3.3 Umgang mit Schätzfehlern: Shrinkage Estimation

Wenn Kovarianzen auf Basis von Beobachtungen einer Stichprobe geschätzt werden, sind die Koeffizienten mit Schätzfehlern verbunden. Die Schätzfehler sind besonders groß, wenn die Anzahl der betrachteten Einzelanlagen im Verhältnis größer ist als die Anzahl der historischen Renditebeobachtungen (Ledoit & Wolf, 2003).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Kovarianz der Renditen von 180 Biogas-Gesellschaften geschätzt, wobei der Schätzung im Minimum zwei und maximal 15 paarweise Renditebeobachtungen zu Grunde liegen. Die Anzahl der betrachteten Einzelanlagen ist in jedem Fall also größer als die Anzahl paarweiser historischer Renditebeobachtungen, was zu dem von Ledoit & Wolf (2003) beschriebenen Problem führen kann: Die Kovarianzmatrix der Stichprobe enthält Extremwerte, die vermutlich nicht „der Wahrheit“ entsprechen, sondern auf extremen Schätzfehlern basieren. Außerdem kann eine sehr kleine Teilstichprobe, bzw. eine geringe Anzahl an paarweisen Beobachtungen, Schätzfehler und Extremwerte in der Kovarianzmatrix verschlimmern.

Ledoit & Wolf (2003) haben einen Ansatz entwickelt, der die Schätzfehler von Kovarianzmatrizen einer Stichprobe verringert und dadurch Investoren vor Fehlentscheidungen durch nicht „der Wahrheit“ entsprechenden Extremwerten schützen soll. Der von Ledoit & Wolf beschriebene Schätzer setzt sich aus der Kovarianzmatrix der Stichprobe S und einem strukturierten Schätzer F zusammen:

$$\delta F + (1 - \delta)S$$

Die „Schrumpfkongstante“ δ kann dabei Werte zwischen null und eins annehmen. Sie misst die Gewichtung des strukturierten Schätzers F . Durch Anwendung dieser Methode wird die Kovarianzmatrix der Stichprobe in Richtung des strukturierten Schätzers „geschrumpft“.

Ledoit & Wolf bezeichnen den Mittelwert der paarweisen Stichprobenkorrelationen als Schätzer der gemeinsamen konstanten Korrelation. Der strukturierte Schätzer F entspricht dem Produkt aus dem Mittelwert der paarweisen Stichprobenkorrelationen \bar{r} und den Stichprobenstandardabweichungen $\sqrt{s_{ii}}$ bzw. $\sqrt{s_{jj}}$. Es erfolgt eine „Rückskalierung“ auf den Wertebereich der Kovarianz:

$$f_{ij} = \bar{r} \sqrt{s_{ii} s_{jj}}$$

Die „Schrumpfkongstante“ δ stellt ein Maß für die Verlässlichkeit des Stichprobenschätzers dar und bestimmt die Intensität der „Schrumpfung“. Die optimale „Schrumpfkongstante“ $\hat{\delta}^*$ minimiert die Differenz zwischen der geschätzten und der wahren Kovarianzmatrix:

$$\hat{\delta}^* = \max \left\{ 0, \min \left\{ \frac{\hat{\kappa}}{T}, 1 \right\} \right\}$$

In bestimmten Fällen kann $\frac{\hat{\kappa}}{T}$ Werte annehmen, die kleiner null oder größer eins sind. Diese werden durch den minimalen Wert null bzw. den maximalen Wert eins ersetzt, weil es sich bei dem Schätzer um eine gewichtete Summe handelt.

Der Nenner T entspricht der Anzahl an Beobachtungszeitpunkten, die bei der Schätzung der Stichprobenkovarianzen berücksichtigt werden. Wenn die Anzahl an Beobachtungszeitpunkten und damit T steigt, während $\hat{\kappa}$ konstant ist, wird die optimale Schrumpfkongstante $\hat{\delta}^*$ im Verhältnis kleiner. Die Schätzungsgüte der Stichprobenkovarianz ist um so besser, je größer die Anzahl an Beobachtungszeitpunkten. Der strukturierte Kovarianzschätzer F wird demnach weniger stark gewichtet als die Kovarianzmatrix der Stichprobe S .

Weiterhin beeinflusst $\hat{\kappa}$ die Höhe des Werts der optimalen Schrumpfkongstante $\hat{\delta}^*$ und damit die Gewichtung des strukturierten Kovarianzschätzers F . Bei konstantem T gilt: Je größer $\hat{\kappa}$, desto größer die optimale Schrumpfkongstante $\hat{\delta}^*$. Bei einem großen $\hat{\kappa}$ wird demnach die strukturierte Matrix F stärker gewichtet als die der Stichprobenkovarianzen S .

Ledoit und Wolf (2003) beschreiben den Schätzer für $\hat{\kappa}$ mit folgender Gleichung:

$$\hat{\kappa} = \frac{\hat{\pi} - \hat{\rho}}{\hat{\gamma}}$$

Wobei $\hat{\gamma}$ den Abstand zwischen den wahren Werten für F und S schätzt:

$$\hat{\gamma} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (f_{ij} - s_{ij})^2$$

Bei f_{ij} bzw. s_{ij} handelt es sich um den Eintrag in Zeile i und Spalte j der Matrix F bzw. S . Je „ähnlicher“ sich F und S sind, desto kleiner wird $\hat{\gamma}$ und desto größer wird $\hat{\kappa}$, unter der Voraussetzung, dass $\hat{\pi}$ und $\hat{\rho}$ konstant sind. Ein kleiner Abstand zwischen F und S führt bei ansonsten konstanten Bedingungen dazu, dass der strukturierte Schätzer F stärker gewichtet wird als die geschätzte Kovarianzmatrix der Stichprobe. Hier wird unterstellt, dass der Schätzer F bei gleichem T eine niedrigere Varianz aufweist als S . Demnach wird f_{ij} auf Basis einer größeren Anzahl an Werten geschätzt als s_{ij} .

Zusätzlich beeinflussen $\hat{\pi}$ und $\hat{\rho}$ die optimale Schrumpfkongstante $\hat{\delta}^*$, wobei $\hat{\pi}$ die Summe der Varianzen der Stichprobenkovarianzen schätzt:

$$\hat{\pi} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \hat{\pi}_{ij}$$

mit

$$\hat{\pi}_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \{(y_{it} - \bar{y}_i)(y_{jt} - \bar{y}_j) - s_{ij}\}^2$$

Auch hier gilt *ceteris paribus*, dass mit zunehmender Summe der Varianzen der Stichprobenkovarianzen $\hat{\pi}$ auch $\hat{\kappa}$ größer wird und damit die optimale „Schrumpfkongstante“ $\hat{\delta}^*$. Bei einer starken Varianz des Schätzers für die Stichprobenkovarianz wird demnach der strukturierte Schätzer F stärker gewichtet als die Kovarianzmatrix der Stichprobe.

Während $\hat{\pi}$ die Summe der Varianzen der Stichprobenkovarianzen schätzt, steht $\hat{\rho}$ für den Schätzer der Summe der Kovarianzen zwischen den Werten der Matrizen F und S :

$$\hat{\rho} = \sum_{i=1}^N \hat{\pi}_{ii} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{\hat{\rho}}{2} \left(\sqrt{\frac{s_{jj}}{s_{ii}}} \hat{\vartheta}_{ii,ij} + \sqrt{\frac{s_{ii}}{s_{jj}}} \hat{\vartheta}_{jj,ij} \right)$$

mit

$$\hat{\vartheta}_{ii,ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \{(y_{it} - \bar{y}_i)^2 - s_{ii}\} \{(y_{it} - \bar{y}_i)(y_{jt} - \bar{y}_j) - s_{ij}\}$$

und

$$\hat{\vartheta}_{jj,ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \{(y_{jt} - \bar{y}_j)^2 - s_{jj}\} \{(y_{it} - \bar{y}_i)(y_{jt} - \bar{y}_j) - s_{ij}\}$$

Hier führt bei ansonsten gleichen Bedingungen ein hoher Wert für $\hat{\rho}$ dazu, dass $\hat{\kappa}$ und damit die optimale „Schrumpfkongstante“ $\hat{\delta}^*$ kleiner wird. Das wiederum bedeutet, dass die strukturierte Matrix F weniger stark gewichtet wird als die Matrix der geschätzten Kovarianzen der Stichprobe S .

Die Ausführungen zeigen, dass die optimale „Schrumpfkongstante“ $\hat{\delta}^*$ maßgeblich durch die Anzahl an Beobachtungszeitpunkten T einer Zeitreihe beeinflusst wird. Die Anwendung der Methode „pairwise deletion“ im Rahmen dieser Arbeit führt dazu, dass die Kovarianzwerte der historischen Renditen der Biogas-Gesellschaften auf Basis von Teilstichproben geschätzt werden. Die Anzahl an paarweisen Beobachtungen entspricht dabei der Anzahl an Beobachtungszeitpunkten T der Teilstichprobe. Bei Teilstichproben mit $T > 1$ können Kovarianzen berechnet werden. Insbesondere Kovarianzen, die auf Basis einer geringen Anzahl an paarweisen Beobachtungen geschätzt werden, unterliegen starken Schätzfehlern.

Bei der Anwendung der Shrinkage Estimation im Rahmen dieser Analyse variieren die Werte für T zwischen zwei und 15. Das hat zur Folge, dass bei der Schätzung der „geschrumpften“ Matrix 14 unterschiedliche optimale Schrumpfkongstanten berücksichtigt werden.

3.2.1.3.4 Umgang mit fehlenden Kovarianzwerten: Imputation

Wenn sich die Zeitreihendaten zweier Biogas-Gesellschaften nicht überschneiden, kann unter Anwendung der Methode „pairwise deletion“ keine Teilstichprobe gebildet werden. Es ist möglich, dass von einer Biogas-Gesellschaft zum Beispiel die Jahresabschlussdaten für den Zeitraum 2005 bis 2009 und von einer anderen Biogas-Gesellschaft für den Zeitraum von 2015 bis 2019 vorliegen. In diesem Fall kann keine Kovarianz berechnet werden. Ebenfalls kann keine Kovarianz berechnet werden, wenn sich die historischen Renditebeobachtungen von zwei Biogas-Gesellschaften nur in einem Jahr überschneiden. Wenn die Teilstichprobe bzw. die Anzahl paarweiser Beobachtungen also kleiner zwei (<2) ist, kann keine Kovarianz berechnet werden und die Kovarianzmatrix weist in diesen Fällen fehlende Werte auf.

Eine wichtige Voraussetzung für die Portfolioanalyse ist es, dass eine vollständige Kovarianzmatrix vorliegt. Neben dem Löschen unvollständiger Datensätze ist die Imputation, also das Ersetzen fehlender Werte gemäß einer Regel, eine Möglichkeit mit fehlenden Werten umzugehen. Im Folgenden werden die fehlenden Kovarianzwerte mit der Methode k-Nearest-Neighbor (KNN) geschätzt.

Die Grundidee des Verfahrens besteht darin, ein unbekanntes Merkmal eines Objektes aufgrund dessen Ähnlichkeit zu bekannten Objekten zu schätzen (James et al., 2021, S. 181 ff.). Im Rahmen dieser Analyse stellt der fehlende Kovarianzwert das unbekannte Merkmal dar. Es wird unterstellt, dass Biogas-Gesellschaften mit ähnlichen Eigenschaften auch ähnliche Kovarianzen aufweisen.

Im Falle eines fehlenden Kovarianzwertes werden die $k=3$ „nächsten Nachbarn“ der betreffenden Biogas-Gesellschaften BGA_i und BGA_j ermittelt. Die Ähnlichkeit der Biogas-Gesellschaften wird anhand der Variablen Jahresergebnis, Bilanzsumme und Netto-Gesamtkapitalrendite bestimmt. Der Nearest Neighbour von BGA_i bzw. BGA_j ist also dadurch gekennzeichnet, dass er ähnliche Werte für die Variablen Bilanzsumme, Jahresergebnis und Netto-Gesamtkapitalrendite aufweist. Da die genannten Variablen in unterschiedlichen Einheiten gemessen werden, werden die beobachteten Werte zunächst skaliert und zentriert. Sie weisen dann den Mittelwert null und eine Standardabweichung von eins auf.

Auf Basis der skalierten und zentrierten Werte für Jahresergebnis, Bilanzsumme und Netto-Gesamtkapitalrendite werden mit Hilfe der euklidischen Distanz die drei „nächsten Nachbarn“ der Biogas-Gesellschaften BGA_i und BGA_j identifiziert, wobei $d(BGA_i, BGA_{i(1)}) \leq d(BGA_i, BGA_{i(2)}) \leq d(BGA_i, BGA_{i(3)})$. Anschließend wird überprüft, ob für die drei „nächsten Nachbarn“ der Biogas-Gesellschaft BGA_i ein Kovarianzwert mit der Biogas-Gesellschaft BGA_j vorliegt. Analog wird für BGA_j vorgegangen. Auf diese Weise werden maximal sechs Kovarianzwerte ermittelt:

- Kovarianz zwischen BGA_j und dem 1. Nachbar von $BGA_i \rightarrow \sigma_{i(1)j}$
- Kovarianz zwischen BGA_j und dem 2. Nachbar von $BGA_i \rightarrow \sigma_{i(2)j}$
- Kovarianz zwischen BGA_j und dem 3. Nachbar von $BGA_i \rightarrow \sigma_{i(3)j}$
- Kovarianz zwischen BGA_i und dem 1. Nachbar von $BGA_j \rightarrow \sigma_{ij(1)}$
- Kovarianz zwischen BGA_i und dem 2. Nachbar von $BGA_j \rightarrow \sigma_{ij(2)}$
- Kovarianz zwischen BGA_i und dem 3. Nachbar von $BGA_j \rightarrow \sigma_{ij(3)}$

Aus diesen maximal sechs Kovarianzen wird der Mittelwert gebildet. Der fehlende Kovarianzwert σ_{ij} zwischen BGA_i und BGA_j wird durch den errechneten Mittelwert ersetzt.

3.2.1.3.5 Umgang mit einer nicht positiv semidefiniten Kovarianzmatrix: Nearest positive semidefinite Matrix

Eine Kovarianzmatrix ist per Definition positiv semidefinit. Durch Schätzfehler kann diese Eigenschaft verletzt werden. Die Portfoliooptimierung auf Basis einer nicht positiv semidefiniten Kovarianzmatrix kann zur Folge haben, dass die Asset Allokation zu Portfolios mit einem negativen Risiko führt. Die Varianz, die das (Portfolio-)Risiko quantifiziert, kann jedoch per Definition keine negativen Werte annehmen.

Bei einer vollständigen Datenmatrix $X \in \mathbb{R}^{N \times p}$ ist die Kovarianzmatrix $C := \frac{1}{N-1} Y^T Y \in \mathbb{R}^{p \times p}$ immer positiv semidefinit, weil für jedes $v \in \mathbb{R}^p$ gilt:

$$v^T C v = \frac{1}{N-1} v^T Y^T Y v$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{N-1} (Yv)^T Yv \\
 &= \frac{1}{N-1} \|Yv\|^2 \geq 0
 \end{aligned}$$

Mit $Y := X - \bar{X}$ wobei X eine Matrix darstellt, die die Spaltenmittelwerte enthält

Der Kovarianzschätzung dieser Arbeit liegt jedoch eine unvollständige Datenmatrix zugrunde. Um dennoch möglichst viele Daten im Rahmen der Analyse berücksichtigen zu können, wird die in Kapitel 3.2.1.3.5 beschriebene Methode „pairwise deletion“ angewandt und die Kovarianzen auf Basis von Teilstichproben geschätzt. Das hat zur Folge, dass die geschätzte Kovarianzmatrix lediglich eine Annäherung darstellt, da sie auf Basis inkonsistenter Datensätze gebildet wurde (Higham, 2002). In der einschlägigen Literatur wird regelmäßig darauf hingewiesen, dass die Anwendung der Methode „pairwise deletion“ eine nicht positiv semidefinite Kovarianzmatrix zur Folge haben kann.

Hinzu kommt, dass die Kovarianzmatrix trotz Anwendung der Methode „pairwise deletion“ fehlende Werte aufweist. Diese Werte werden unter Anwendung der Methode „k-Nearest Neighbor“ imputiert, ohne den Einfluss auf die Definitheit der Matrix zu berücksichtigen. Das Imputieren fehlender Kovarianzwerte kann demnach ebenfalls eine mögliche Ursache für eine nicht positiv semidefinite Matrix sein.

Bevor die geschätzte Kovarianzmatrix der Biogas-Gesellschaften für die Portfolioanalyse verwendet wird, wird zunächst ihre Definitheit bestimmt. Eine quadratische symmetrische (bzw. hermitesche) $(n \times n)$ -Matrix A ist genau dann

- positiv definit mit $x^T Mx > 0$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$, wenn alle Eigenwerte größer als null sind
- positiv semidefinit mit $x^T Mx \geq 0$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$, wenn alle Eigenwerte größer oder gleich null sind
- negativ definit mit $x^T Mx < 0$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$, wenn alle Eigenwerte kleiner als null sind
- negativ semidefinit mit $x^T Mx \leq 0$ für alle $x \in \mathbb{R}^n$, wenn alle Eigenwerte kleiner oder gleich null sind
- indefinit, wenn positive und negative Eigenwerte existieren (Karpfinger, 2017, S. 473 ff.).

Es kann also jedes Verfahren zur Bestimmung oder Abschätzung von Eigenwerten genutzt werden, um die Definitheit einer Matrix zu ermitteln. Bei symmetrischen Matrizen sind die Singulärwertzerlegung und die Eigenwertzerlegung identisch und führen zum gleichen Ergebnis. Zur Bestimmung der Eigenwerte der Kovarianzmatrix wird in dieser Arbeit die Singulärwertzerlegung (Karpfinger, 2017, S. 445 ff.) verwendet. Nach jeder Schätzung einer vollständigen Kovarianzmatrix werden die Anzahl negativer sowie positiver Eigenwerte und damit die Definitheit bestimmt.

Insbesondere die Finanzindustrie ist häufig mit fehlenden Werten historischer Wertpapierrenditen konfrontiert und greift auf die Methode „pairwise deletion“ zurück. Das kann, wie beschrieben, negative Eigenwerte der Korrelationsmatrix zur Folge haben. Motiviert durch dieses Problem hat Nicholas J. Higham (2002) einen Algorithmus entwickelt, der in der Lage ist, die nächstmögliche positiv semidefinite Korrelationsmatrix zu berechnen. Er nutzt dabei die Frobenius Norm zur Messung des Abstands zwischen der geschätzten Kovarianzmatrix mit negativen Eigenwerten A und einer positiv semidefiniten Matrix X , die die Norm minimiert:

$$\gamma(A) = \min\{\|A - X\| : X \text{ ist eine Korrelationsmatrix}\}$$

Aus der Veröffentlichung von Higham (2002) geht hervor, dass für die Schätzung einer symmetrischen positiv semidefiniten Kovarianzmatrix A_+ die Spektraldekomposition den Hauptteil der Lösung des Optimierungsproblems darstellt:

$$A_+ = Q \text{diag}(\max(\lambda_i, 0))Q^T$$

Dem entsprechend werden die negativen Eigenwerte der Kovarianzmatrix gleich Null gesetzt und mit ihren Eigenwerten multipliziert. Die auf diese Weise ermittelte Kovarianzmatrix ist positiv semidefinit und minimiert die Frobenius Norm zur ursprünglich geschätzten Matrix mit negativen Eigenwerten.

3.2.2 Analyse des Portfolioeffekts

3.2.2.1 Portfolioeffekt bei Markowitz-Diversifikation

Nachdem Rendite und Risiko der einzelnen Biogas-Gesellschaften geschätzt wurden, lassen sich die 180 Einzelanlagen aus denen Portfolios gebildet werden können, im Risiko-Rendite-Diagramm positionieren. Rendite und Risiko einer Einzelanlage werden dadurch nicht mehr isoliert betrachtet, sondern es werden beide Dimensionen in einem Diagramm abgebildet. Der Mittelwert der historischen Renditen der Biogas-Gesellschaften wird auf der Ordinate dargestellt. Das Risiko, also die historische Standardabweichung der Renditen, der Value at Risk sowie der Conditional Value at Risk, wird jeweils auf der Abszisse dargestellt. Gemäß der Portfoliotheorie und unter der Annahme eines risikoaversen Investors ist eine möglichst hohe Rendite in Verbindung mit einem möglichst niedrigen Risiko anzustreben.

Bruns & Meyer-Bullerdiek (2013, S. 2) fassen das Verhältnis von Rendite und Risiko in einer Kennzahl zusammen und nennen sie Performance. Die Performance, als zweidimensionale Zielgröße wird auch als risikoadjustierte Rendite bezeichnet:

$$\text{Performance} = \frac{\text{Anlagerendite}}{\text{Anlagerisiko}}$$

Die Definition der Performance von Bruns & Meyer Bullerdiek entspricht der Sharpe Ratio bei einem risikofreien Zins von null Prozent:

$$\text{Sharpe Ratio} = \frac{R_p - R_f}{\sigma_p}$$

Die Sharpe Ratio berücksichtigt den risikolosen Zins R_f , der von der betrachteten Anlagerendite R_p abgezogen wird. Somit wird nur die Überrendite gegenüber der risikolosen Anlage berücksichtigt und ins Verhältnis zur Standardabweichung der Anlagerendite σ_p gesetzt. Beträgt der risikolose Zins null Prozent entspricht die Sharpe Ratio der von Bruns & Meyer Bullerdiel definierten Performance.

Im April 2019, als die Daten für diese Arbeit abgerufen wurden, lag der risikolose Zins entsprechend Abbildung 38 bei 0,01% (Fenebris.com, 2023). Insgesamt ist der Zeitraum seit 2016 durch die „Nullzinspolitik“ der EZB gekennzeichnet. Seit März 2016 beträgt der Leitzins 0,00% und wurde erstmals im Juli 2022 erhöht (EZB, 2023).

Dem entsprechend wird für die folgenden Analysen ein risikoloser Zins von null Prozent unterstellt und die Sharpe Ratio entspricht dem Verhältnis von Rendite zu Risiko.

$$\text{Sharpe Ratio} = \frac{R_p - 0,00\%}{\sigma_p} = \frac{R_p}{\sigma_p}$$

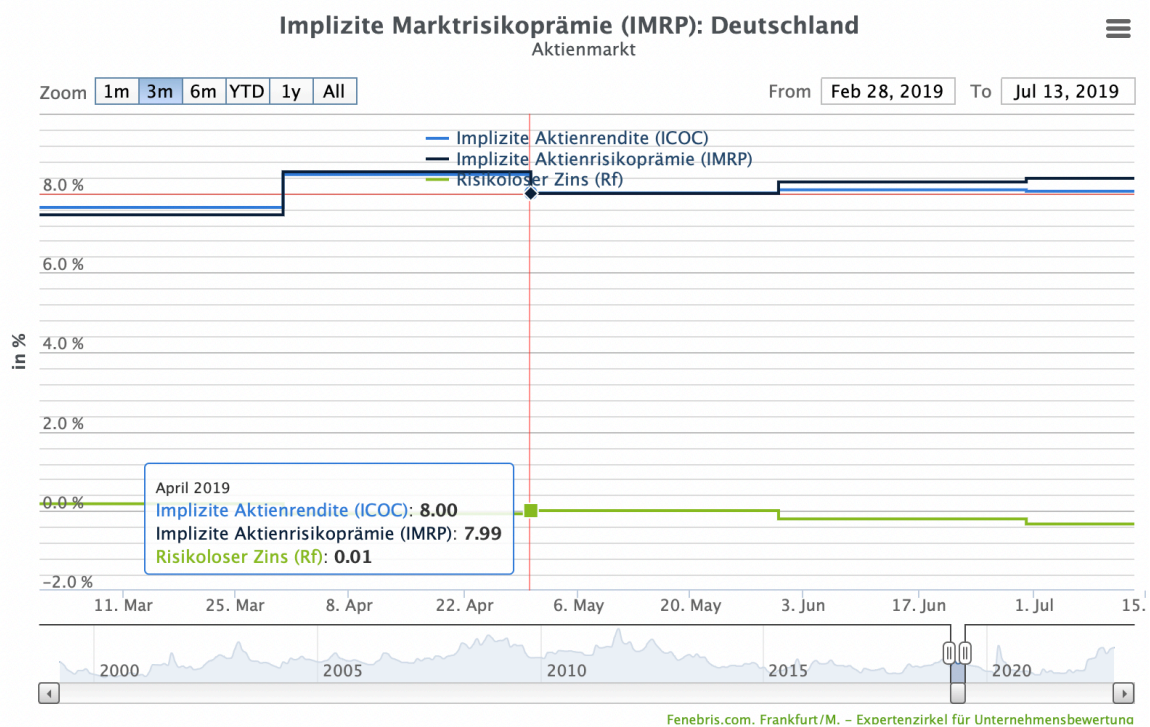


Abbildung 38: Risikoloser Zins im April 2019
 Quelle: Fenebris.com (2023)

Je höher die Sharpe-Ratio, desto besser für den risikoaversen Anleger. Ein Nachteil der Sharpe Ratio ist, dass Sie nur für positive Renditen interpretierbare Ergebnisse liefert. Die Standardabweichung als Risikomaß im Nenner kann keine negativen Werte annehmen, die Rendite im Zähler dagegen schon. Auch bei negativen Renditen gilt zunächst: Je höher die negative Rendite, desto kleiner die Sharpe Ratio. Mit zunehmendem Risiko, also steigender

Standardabweichung und gleichbleibend negativer Rendite steigt die Sharpe Ratio jedoch wieder. Daher liefert die Sharpe Ratio bei negativen Renditen kein interpretierbares Ergebnis.

Um auch Anlageprodukte mit negativer Rendite vergleichbar zu machen, hat Craig L. Israelsen (2005) die Modified Sharpe-Ratio entwickelt, die er mit folgender Formel beschreibt:

$$\text{Modified Sharpe Ratio} = \frac{ER}{SD\left(\frac{ER}{\text{abs}ER}\right)}$$

Wie bei der Sharpe Ratio steht im Zähler die überschüssige Rendite (excess return). Die Standardabweichung im Nenner wird exponiert. Der Exponent entspricht dabei der überschüssigen Rendite dividiert durch den absoluten Wert der überschüssigen Rendite. Er kann demnach die Werte 1 und -1 annehmen. Bei positiven Renditen führt die Modified Sharpe Ratio zu identischen Ergebnissen wie die Sharpe Ratio. Bei negativen Renditen ermöglicht die Modified Sharpe Ratio ein konsistentes Ranking, auch wenn die Ziffer selbst nicht sinnvoll interpretierbar ist. Das liegt daran, dass die Sharpe Ratio dimensionslos ist, während die Modified Sharpe Ratio für negative Renditen die Einheit $\%^2$ aufweist.

Die Risikomaße Value at Risk und Conditional Value at Risk berücksichtigen bereits die beiden Dimensionen Rendite und Standardabweichung. Sie werden im Rahmen dieser Arbeit rechnerisch nicht zusätzlich ins Verhältnis zur erwarteten Rendite gesetzt, jedoch für den besseren Überblick ebenfalls im Rendite-Risiko-Diagramm dargestellt.

Gemäß der Definition von Markowitz sind effiziente Portfolios dadurch gekennzeichnet, dass ausgehend von einer festgelegten Rendite kein anderes Portfolio ein niedrigeres Risiko aufweist bzw. bei gleichem Risiko kein anderes Portfolio mit einer höheren Rendite existiert. Die Menge aller Portfolios, die dem Effizienzkriterium entsprechen, bildet im Rendite-Risiko-Diagramm die Effizienzlinie (Ernst & Schurer, 2015, S. 216).

Im Gegensatz zu Wertpapieren gibt es für Biogasanlagen keinen Markt für Leerverkäufe. Unter der Annahme, dass keine Leerverkäufe möglich sind, erstreckt sich der Bereich möglicher Renditen zwischen der minimalen und der maximalen Rendite, die im Datensatz beobachtet wurde. Grundlage für die Ermittlung der effizienten Portfolios bildet ein Vektor aller möglichen Renditen. Für jedes Renditeniveau wird über eine Iteration das Portfolio mit der geringsten Standardabweichung bzw. mit dem geringsten Value at Risk und dem geringsten Conditional Value at Risk ermittelt (Mondello, 2015, S. 346).

$$\min_w = f(w)$$

unter den Nebenbedingungen

$$w' \mu = \mu_{\text{Ziel}}$$

$$w_i \geq 0$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

Wobei f die Funktion zur Berechnung der Standardabweichung, Value at Risk oder Conditional Value at Risk sein kann (vgl. 3.2.1.2):

$$\sigma_p^2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n x_j \cdot x_k \cdot \sigma_j \cdot \sigma_k \cdot \rho_{j,k}$$

$$VaR_\alpha(x) = -\mu + Z_\alpha \cdot \sigma(x)$$

$$CVaR_\alpha(x) = -\mu + \frac{\varphi(Z_\alpha)}{\alpha} \sigma(x)$$

Die Suche nach dem varianzminimalen Portfolio bei gegebener Rendite stellt ein konvexes Optimierungsproblem dar, das durch quadratische Programmierung gelöst wird. Bei der parametrischen Form des Value at Risk und des Conditional Value at Risk wird davon ausgegangen, dass die Renditen normalverteilt sind. Bei den Formeln für Value at Risk und Conditional Value at Risk ist also nicht nur die Zielrendite $E(x)$ gegeben, sondern auch Z_α bzw. $\frac{\varphi(Z_\alpha)}{\alpha}$ sind konstant, sodass das Optimierungsproblem identisch mit dem der Varianz ist. Demnach sind auch Gewichtungen der Portfolioanteile bei gegebenen Zielrenditen bei allen drei Risikomaßen identisch. Die risikominimalen Portfolios liegen jedoch an unterschiedlichen Stellen auf der Effizienzlinie. Oder anders ausgedrückt: Die Zusammensetzung der risikominimalen Portfolios wird sich in Abhängigkeit vom Risikomaß unterscheiden.

Die oben genannten Nebenbedingungen stellen sicher, dass

- die Portfoliorendite dem vorgegebenen Renditeniveau entspricht,
- die Gewichtung der Portfolioanteilen nicht kleiner als Null ist, da kein Short Selling erlaubt ist und
- sich alle Gewichte zu eins aufaddieren, also das gesamte Budget investiert wird.

Neben den risikominimalen Portfolios wird im Rahmen der Rendite-Standardabweichung-Betrachtung das Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio ermittelt. Es handelt sich dabei um das Tangentialportfolio. Das Tangentialportfolio ist das Portfolio, das unter Einbezug einer risikolosen Anlage die höchstmögliche Rendite im Vergleich zum Risiko liefert. Die Kapitalmarktlinie beschreibt effiziente Portfolios im Marktgleichgewicht. Sie verläuft ausgehend vom risikolosen Zinssatz R_f und bildet die Tangente zur Effizienzlinie (Ernst & Schurer, 2015, S. 233 ff.).

Um den Diversifikationseffekt zu quantifizieren werden verschiedene Punkte im Rendite-Risiko-Diagramm verglichen. Ohne den durch Markowitz beschriebenen Portfolioeffekt würde das Portfoliorisiko analog zur Rendite den gewichteten Summen der Einzelrisiken

entsprechen. Anders ausgedrückt entspricht der Referenzpunkt dem Risiko bei einer vollständigen Korrelation der Anlagen im Portfolio untereinander.

Außerdem lässt sich die Formel für die Berechnung der Portfoliovarianz in zwei Terme aufteilen:

$$\sigma_p^2 = \sum_i w_i^2 \sigma_i^2 + \sum_i \sum_{j \neq i} w_i w_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}$$

Bei dem ersten Term handelt es sich um die gewichtete Summe der Varianzen und beim zweiten Term um die gewichtete Summe der Kovarianzen. Um zu ermitteln welcher Teil der Risikoreduktion auf die Korrelation bzw. die Kovarianz der Anlagen untereinander zurückzuführen ist, wird die Differenz zwischen der Portfoliovarianz und der gewichteten Summe der Kovarianzen gebildet. Mit zunehmender Anzahl an Einzelanlagen im Portfolio nimmt die Bedeutung der Kovarianzrisiken überproportional zu (Garz et al., 2006, S. 42).

3.2.2.2 Portfolioeffekt bei naiver Diversifikation

Im vorherigen Kapitel wurde untersucht ob und in welchem Umfang es möglich ist, durch die Bildung effizienter und optimaler Biogasanlagen-Portfolios das Risiko-Rendite-Verhältnis im Gegensatz zur Einzelanlage zu verbessern. Verschiedene Gründe führen jedoch dazu, dass die Grundsätze der Portfoliotheorie bei Investitionen in Biogasanlagen nicht uneingeschränkt berücksichtigt wurden oder werden können. Zum Beispiel ist die Annahme der beliebigen Verfügbarkeit und Teilbarkeit der Einzelanlagen in der Praxis nicht haltbar. Außerdem ist es möglich, dass Investoren nicht über das Wissen verfügen, wie bei der modernen Portfoliotheorie vorgegangen werden sollte oder sie nicht alle benötigten Eingangsdaten kennen (Spremann, 2008, S. 278)

Vor diesem Hintergrund wird in diesem Kapitel untersucht ob und in welchem Umfang Risiko-Rendite-Verhältnis von Biogasanlagen-Portfolios durch naive Diversifikation verbessert werden kann. Zunächst werden aus den 180 Biogasanlagen der Stichprobe je Portfoliogröße (1-180) 10.000 gleichgewichtete Zufallsportfolios gebildet. Analog zur Herangehensweise von Dunlop (2004) werden die Einzelanlagen für diese Analyse gleichgewichtet. Die Möglichkeit einer alternativen risikolosen Anlage wird ebenso nicht berücksichtigt. Je Portfoliogröße wird das mittlere Risiko berechnet (SD, VaR, CVaR) und im Verhältnis zur Portfoliogröße in einem Diagramm visualisiert.

Die fehlende Teilbarkeit und sofortige Liquidierbarkeit bei Sachwertinvestitionen führt in der Regel dazu, dass ein vorhandenes Portfolio um eine zusätzliche Investition ergänzt wird. Für die Risikobeurteilung ist dann nicht mehr das Einzelrisiko des Anlageobjekts, sondern der Risikobeitrag zum Gesamtrisiko des Portfolios entscheidend. Investoren entscheiden über die

Weiterführung des Portfolios wie bisher oder des um die zusätzliche Investition ergänzten Portfolios (Busse von Colbe et al., 2015, S. 256).

Dementsprechend wird der folgenden Analyse der Praxisfall zugrunde gelegt, dass ein Investor bereits eine Einzelanlage bzw. ein Portfolio an Biogasanlagen besitzt und in eine weitere Anlage investiert. Die Frage ist wie sich das Risiko-Rendite-Verhältnis ausgehend von Einzelanlagen oder Portfolios verändert, wenn in eine weitere zufällig ausgewählte Anlage investiert wird. Im Rahmen der Simulation werden gleichgewichtete Portfolios dahingehend untersucht, welchen Beitrag eine zusätzliche Investition auf die folgenden Parameter der Portfolios hat:

- Standardabweichung: $\hat{\sigma}_P^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i \cdot x_j \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j \cdot \rho_{i,j}$
- Value at Risk: $\widehat{VaR}_\alpha(x) = -\hat{\mu}_P + Z_\alpha \cdot \hat{\sigma}_P(x)$
- Conditional Value at Risk: $\widehat{CVaR}_\alpha(x) = -\hat{\mu}_P + \frac{\varphi(N_{1-\alpha})}{\alpha} \hat{\sigma}_P(x)$

Um Aussagen zur Änderung der genannten Portfolioparameter durch eine zusätzliche Investition machen zu können, muss die Ausgangssituation bekannt sein. Die genannten Parameter können für die 180 Einzelanlagen der Stichprobe ermittelt werden. Für Portfolios unterschiedlicher Größe liegen jedoch keine Daten vor. Um die Portfolioparameter zu ermitteln, wird auf die Monte-Carlo-Simulation zurückgegriffen. Die Monte-Carlo-Simulation ist ein Verfahren aus der Stochastik bzw. Wahrscheinlichkeitstheorie, bei dem wiederholt Zufallsstichproben einer Verteilung mithilfe von Zufallsexperimenten gezogen werden (Ernst & Schurer, 2015, S. 189).

Auf Basis der 180 Einzelanlagen der Stichprobe werden zufällige Portfolios erzeugt. Die Gewichtung der Einzelanlagen ist dabei jeweils identisch und jede Einzelanlage kann nur einmal im Portfolio enthalten sein. Alternativ zur Gleichgewichtung der Portfolios, hätte eine Gewichtung entsprechend der Höhe der Bilanzsummen der Einzelanlagen vorgenommen werden können. Die starken Größenunterschiede der Einzelanlagen hätten so jedoch zu Verzerrungen der Ergebnisse führen können. Außerdem ist es in der Praxis zu beobachten, dass mehrere Investoren Anteile an einer Biogasanlage halten. Die Teilbarkeit der Einzelanlagen ist, wenn auch nicht uneingeschränkt, eine realistische Annahme und wird durch die Gleichgewichtung abgebildet. Für die erzeugten Portfolios werden basierend auf den Eigenschaften der Einzelanlagen die oben genannten Parameter berechnet. Dieser Schritt wird je Portfoliogröße tausendmal wiederholt, sodass je Portfoliogröße 1.000 Szenarios berücksichtigt werden. Die Verteilungen der Portfolioparameter werden in einer deskriptiven Statistik zusammengefasst.

Außerdem wird eine Ausgangssituation berücksichtigt, bei der nur eine Einzelanlage im Besitz des Investors ist und in eine weitere Anlage investiert wird. In diesem Fall werden alle 180 Einzelanlagen der dieser Untersuchung zugrunde liegenden Stichprobe in der deskriptiven Statistik berücksichtigt.

Ausgehend von den 180 Einzelanlagen bzw. den je 1.000 Zufallsportfolios pro Portfoliogröße wird die Investition in eine weitere Biogasanlage simuliert. Je Iteration ergibt sich das Anlageuniversum aus den Biogasanlagen, die nicht im Bestandsportfolio enthalten sind. Für jede Biogasanlage, die nicht im Portfolio enthalten ist, wird ermittelt, wie sich die Portfolioparameter verändern, wenn zusätzlich in diese Anlage investiert wird. Dadurch können in Abhängigkeit von der Größe der Bestandsportfolios unterschiedlich viele neue Portfolios mit zwei, sechs, elf oder 21 Biogasanlagen simuliert und deren Parameter berechnet werden.

- Ausgehend von 180 Einzelanlagen, können je Einzelanlage 179 Kombinationen berücksichtigt werden (N=32.220 neue Portfolios)
- Ausgehend von 1.000 Portfolios mit 5 Einzelanlagen, können je Portfolio 175 Kombinationen berücksichtigt werden (N=175.000 neue Portfolios)
- Ausgehend von 1.000 Portfolios mit 10 Einzelanlagen, können je Portfolio 170 Kombinationen berücksichtigt werden (N=170.000 neue Portfolios)
- Ausgehend von 1.000 Portfolios mit 20 Einzelanlagen, können je Portfolio 160 Kombinationen berücksichtigt werden (N=160.000 neue Portfolios)

Die Ergebnisse dieser Simulation werden ebenfalls je Parameter in einer deskriptiven Statistik dargestellt.

Die Simulation der Zufallsportfolios sowie der zusätzlichen Investition in eine weitere Biogasanlage ist die Grundlage der Definition von zwei Mengen:

1. Sei $BP \in \{1, \dots, 180\}$ die Menge der Anlagen im Bestandsportfolio.
2. Dann ist $BP + 1 \in \{1, \dots, 180\}$ die Menge der Anlagen im Bestandsportfolio plus eine weitere Anlage (Zufallsportfolio).

Anschließend wird die Differenz zwischen den Parametern der neuen Zufallsportfolios und denen der Bestandsportfolios berechnet:

- Für das Portfoliorisiko: $\Delta\hat{\sigma}^2 = \hat{\sigma}_{BP+1}^2 - \hat{\sigma}_{BP}^2$
- Für den Value at Risk: $\Delta\widehat{VaR} = \widehat{VaR}_{BP+1} - \widehat{VaR}_{BP}$
- Für den Conditional Value at Risk: $\Delta\widehat{CVaR} = \widehat{CVaR}_{BP+1} - \widehat{CVaR}_{BP}$

Die Häufigkeitsverteilung der Änderungen wird in einem Histogramm dargestellt. Um Handlungsempfehlungen für Investoren abzuleiten, wird parameterspezifisch untersucht, was die Treiber für die Änderungen sind.

Standardabweichung

Die Änderung des Portfoliorisikos beruht nicht nur auf den gewichteten Risiken der Einzelanlagen, sondern auch auf deren Kovarianz untereinander. Unter Verwendung der Varianz als Risikomaß, statt der Standardabweichung, lassen sich Aussagen dazu treffen welcher Teil der

Risikoänderung auf die Gewichtung der Einzelrisiken zurückzuführen ist und welcher Teil durch die Kovarianz verursacht wird. Außerdem ist zu erkennen in welche Richtung der Effekt wirkt, also ob das Portfoliorisiko erhöht oder reduziert wird. Dafür wird die Formel für die Portfoliovarianz zugrunde gelegt:

$$\sigma_{BP}^2 = \sum_{i \in BP} w_i^2 \sigma_i^2 + \sum_{i \in BP} \sum_{j \neq i, j \in BP} w_i w_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}$$

Die Varianz der Portfolios lässt sich in zwei Teile zerlegen:

1. Die Summe der quadratisch gewichteten Varianzen $\sum_{i \in BP} w_i^2 \sigma_i^2$
2. Die Summe der gewichteten Kovarianzen $\sum_{i \in BP} \sum_{j \neq i, j \in BP} w_i w_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}$

Die Änderungen lassen sich dann folgendermaßen berechnen:

1. $\Delta \sigma^2 = \hat{\sigma}_{BP+1}^2 - \hat{\sigma}_{BP}^2$
2. $\Delta \omega = \sum_{i \in BP+1} w_i^2 \sigma_i^2 - \sum_{i \in BP} w_i^2 \sigma_i^2$
3. $\Delta \rho = \sum_{i \in BP+1} \sum_{j \neq i, j \in BP+1} w_i w_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij} - \sum_{i \in BP} \sum_{j \neq i, j \in BP} w_i w_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}$

Die Gesamtänderung der Varianz des Portfolios ($\Delta \sigma^2$) lässt sich in die Änderung durch die Gewichtung ($\Delta \omega$) und die Änderung durch die Kovarianz aufteilen ($\Delta \rho$). Die Summe aus der Änderung durch die Gewichtung und der Änderung durch die Kovarianz entspricht der Gesamtänderung der Varianz des Portfolios.

Value at Risk und Conditional Value at Risk

Der Value at Risk und der Conditional Value at Risk werden durch die Parameter Rendite und Standardabweichung als Risikomaß beeinflusst. Der mathematische Zusammenhang ist hier ebenfalls additiv:

$$\widehat{VaR}_\alpha(x) = -\hat{\mu}_P + Z_\alpha \cdot \hat{\sigma}_P(x)$$

$$\widehat{CVaR}_\alpha(x) = -\hat{\mu}_P + \frac{\varphi(N_{1-\alpha})}{\alpha} \hat{\sigma}_P(x)$$

Die Formeln unterscheiden sich lediglich in der Gewichtung der Standardabweichung als Risikomaß. Die Änderung des Value at Risk bzw. des Conditional Value at Risk lässt sich aufteilen in:

1. Die Änderung durch die Rendite $\Delta \mu = \mu_{BP+1} - \mu_{BP}$
2. Die Änderung durch die Standardabweichung

$$\Delta \sigma_{VaR} = Z_\alpha \sigma_{BP+1} - Z_\alpha \sigma_{BP}$$

$$\Delta \sigma_{CVaR} = \frac{\varphi(N_{1-\alpha})}{\alpha} \sigma_{BP+1} - \frac{\varphi(N_{1-\alpha})}{\alpha} \sigma_{BP}$$

Die Summe aus der Änderung durch die Rendite und der Änderung durch die Standardabweichung entspricht unter Berücksichtigung der Gewichtung der Standardabweichung der Gesamtänderung des Value at Risk bzw. Conditional Value at Risk des Portfolios. Die Höhe des Anteils an der Gesamtänderung gibt an, welcher Parameter (Risiko oder Rendite) den Value at Risk bzw. Conditional Value at Risk stärker beeinflussen.

3.2.2.3 Systematisches und unsystematisches Risiko der Biogasanlageninvestition

Die Sharpe Ratio setzt die Überrendite einer Anlage ins Verhältnis zum Risiko und gilt als beliebtes Maß für die Performance von Einzelanlagen und Portfolios. Ein häufig beschriebener Nachteil der Sharpe Ratio ist, dass nicht zwischen systematischem und unsystematischem Risiko unterschieden wird. Dabei ist es von Vorteil beim Risiko eines Portfolios zwischen den beiden Komponenten systematisch und unsystematisch zu unterscheiden.

In der Portfoliotheorie bzw. dem Capital Asset Pricing Model versteht man unter dem unsystematischen Risiko den Anteil, der durch die Aufnahme weiterer Anlagen in das Portfolio reduziert werden kann. Beim systematischen Risiko handelt es sich um ein residuales Restrisiko, welches nicht diversifizierbar ist. Es ist das Risiko, das dem Markt zugrunde liegt. Ein Maß für das systematische Risiko ist der Betafaktor (Garz et al., S. 43).

Der Betafaktor misst im Capital Asset Pricing Model die Beziehung zwischen der Überrendite der Einzelanlage und dem Marktportfolio und damit, wie stark eine Einzelanlage auf die Einflussgröße „Markt“ reagiert. Bevor der Betafaktor für die 180 Biogasanlagen dieser Stichprobe geschätzt werden kann, soll zunächst das Marktportfolio bzw. ein geeigneter Marktindex definiert werden.

Marktportfolio und Marktindex

In der Theorie entspricht das Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio (Tangentialportfolio) dem Marktportfolio. Im Marktportfolio ist das gesamte Diversifikationspotenzial ausgeschöpft (Garz et al., 2006, S. 68), sodass das Portfoliorisiko dem systematischen Risiko entspricht. Da die zugrunde liegenden Annahmen des Capital Asset Pricing Model, wie die eines vollkommenen Kapitalmarkts, homogene Erwartungen der Investoren sowie die Existenz einer risikolosen Anlage nicht uneingeschränkt der Realität entsprechen, stimmt in der Praxis das Marktportfolio selten mit dem Tangentialportfolio überein. Außerdem kann das theoretisch korrekte Marktportfolio, welches sämtliche Assets enthält, nicht ermittelt und demnach in empirischen Arbeiten nicht eingesetzt werden (Bruns & Meyer-Bullerdiek, 2013, S. 90). In der Praxis wird das Marktportfolio daher in der Regel mit einem Marktindex gleichgesetzt, bzw. soll der Marktindex eine hinreichend genaue Annäherung für das Marktportfolio darstellen (Spremann, 2008, S. 302).

Dunlop (2004) beschreibt in seiner Arbeit, dass für Windenergie kein mit Aktienindizes vergleichbarer Index, wie z.B. der S&P 500, existiert. Gleiches gilt für Investitionen in Biogasanlagen, auch dafür existiert kein Index. Dunlop (2004) hat daher im Rahmen seiner Arbeit einen Index für Windenergie auf Basis seiner Stichprobendaten entwickelt. Analog sollen die Zeitreihen der Renditeentwicklung der 180 Biogasanlage in dieser Arbeit als Index herangezogen werden. Die Gewichtung im Index erfolgt auf Basis der durchschnittlichen Bilanzsumme der Einzelanlagen, die stellvertretend für die Größe einer Anlage und deren „Marktkapitalisierung“ stehen soll.

Schätzung des Betafaktors

Die Gleichung des Capital Asset Pricing Model lautet (Ernst & Schurer, 2015, S. 246), wobei R_i die Rendite der Einzelanlage beschreibt, R_f den risikolosen Zins und R_M die Rendite des Marktportfolios:

$$R_i = R_f + \beta_i(R_M - R_f)$$

$$\beta_i = \frac{\sigma_i \rho_{i,M}}{\sigma_M}$$

Die Komponenten des Modells lassen sich durch eine bivariate Regression schätzen:

$$R_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta}_i(R_M - R_f) + \varepsilon$$

Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt dabei den Anteil des Risikos an, der durch den Markt $R_M - R_f$ erklärt werden kann. Der unsystematische Teil des Risikos ist dabei mit dem Residuum ε gleichzusetzen. Im Falle der bivariaten Regression gilt:

$$R^2 = \rho_{i,M}^2$$

Demnach können die Betafaktoren aus der in Kapitel 3.2.1.3 geschätzten Kovarianzmatrix berechnet werden. Für die Kovarianz zwischen der einzelnen Biogasanlage und dem Marktportfolio gilt:

$$\sigma_{i,M} = \sum_j^N w_j \sigma_{ij}$$

Wobei w_j die Gewichtung der BGA_j im Marktportfolio darstellt. Das unsystematische Risiko entspricht dann $\sigma_i(1 - R^2)$ und das systematische Risiko $\sigma_i R^2$.

3.2.3 Erklärung der Modellparameter

3.2.3.1 Erklärung von Rendite und Risiko (SD, VaR, CVaR)

Die in Kapitel 3.2.2.1 beschriebene Formel zur Berechnung des Portfoliorisikos zeigt, dass die Veränderung des Risikos durch Portfoliobildung auf zwei mögliche Ursachen zurückzuführen

ist. Bei der Berechnung des Portfoliorisikos wird nicht nur das (gewichtete) Risiko der Einzelanlagen berücksichtigt, sondern auch die Kovarianz zwischen den Einzelanlagen im Portfolio. Je geringer die Korrelation der Renditen, desto stärker der Portfolioeffekt. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen für Investoren abzuleiten, welche Investitionen vorteilhaft sind um vom Portfolioeffekt zu profitieren. Dafür sollen im Folgenden Rendite und Risiko (SD, VaR, CVaR) der Einzelanlagen in diesem Kapitel und die Kovarianz zwischen den Einzelanlagen im folgenden Kapitel erklärt werden.

Um die abhängigen Variablen Rendite und Risiko (SD, VaR, CVaR) zu erklären, werden die folgenden unabhängigen Variablen herangezogen:

- Anlagevermögen (Größe der BGA)
- Eigenkapitalquote
- Alter der BGA
- Region der BGA
- Rechtsform der Projektgesellschaft

Anlagevermögen [AV]

Da die Biogasanlage bei der Projektgesellschaft bilanziert ist, dient die Höhe des Anlagevermögens als Indikator für die Größe der Biogasanlage. Es wird angenommen, dass die im Anlagevermögen aktivierte Investitionssumme um so höher ist, je größer die Biogasanlage. Da das Anlagevermögen im Zeitverlauf z.B. durch nachträgliche Investitionen steigen oder z.B. durch Abschreibungen sinken kann, wird der Maximalwert im Zeitverlauf verwendet. Das Anlagevermögen wird logarithmiert, um Heteroskedastizität entgegenzuwirken.

Eigenkapitalquote [EKQ]

Die Eigenkapitalquote beschreibt den Anteil des Eigenkapitals am Gesamtkapital, welches der Bilanzsumme entspricht. Je höher der Anteil des Eigenkapitals, desto geringer ist der Anteil an Fremdkapital z.B. durch eine Bankfinanzierung. Auch die Eigenkapitalquote schwankt im Zeitverlauf, sodass der Mittelwert für die folgende Regressionsanalyse herangezogen wird.

Alter der BGA [ALT]

Als Indikator für das Alter einer Biogasanlage dient das Jahr des ersten im Bundesanzeiger veröffentlichten Jahresabschlusses.

Region der BGA [REG]

Um die nominal skalierte Variable Standort im Rahmen der Regressionsanalyse zu berücksichtigen, werden die Bundesländer den Regionen Süd-Ost, Nord-Ost, Nord-West und Süd-West entsprechend der folgenden Tabelle 18 zugeordnet.

Tabelle 18: Kategorisierung der Bundesländer in Regionen

Region	Bundesländer
Süd-Ost	Bayern
Nord-Ost	Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Berlin, Mecklenburg-Vorpommern
Nord-West	Schleswig-Holstein, Hamburg, Niedersachsen, Bremen, Nordrhein-Westfalen
Süd-West	Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Baden-Württemberg

Quelle: Eigene Darstellung

Über die Postleitzahl des Biogasanlagen-Standortes können diese den jeweiligen Regionen zugeordnet werden und als nominale skalierte Variable in die Analyse einfließen.

Rechtsform der Projektgesellschaft [REFO]

Ebenso handelt es sich bei der Rechtsform der Biogasgesellschaft um eine nominal skalierte Variable, die die Ausprägungen GmbH, GmbH & Co. KG und UG (haftungsbeschränkt) & Co. KG annehmen kann. Die beiden Mischformen GmbH & Co. KG und UG (haftungsbeschränkt) & Co. KG werden aufgrund ihrer Ähnlichkeit in der Kategorie KG zusammengefasst, sodass zwischen Kapitalgesellschaft und Personengesellschaft unterschieden werden kann.

Vor dem Hintergrund der beschriebenen abhängigen und unabhängigen Variablen lassen sich folgende Hypothesen ableiten:

Tabelle 19: Hypothesen zu den Variablen des Regressionsmodells

	Rendite (GKR_{netto})	Risiko (SD, VaR, CVaR)
AV	Je höher das Anlagevermögen, desto höher die Rendite	Je höher das Anlagevermögen, desto geringer das Risiko
EKQ	Je höher der EK-Anteil, desto höher die Rendite	Je höher der EK-Anteil, desto geringer das Risiko
ALT	Je höher das Alter, desto höher die Rendite	Je höher das Alter, desto geringer das Risiko
REG	Die Rendite unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Region	Das Risiko unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Region
REFO	Die Rendite unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Rechtsform	Das Risiko unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Rechtsform

Quelle: Eigene Darstellung

Das folgende multiple lineare Regressionsmodell stellt die Grundlage für die Schätzung dar:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_{AV} \log(AV)_i + \beta_{EKQ} EKQ_i + \beta_{ALT} ALT_i + \beta_{REG} REG_i + \beta_{REFO} REFO_i + \varepsilon_i$$

Wobei Y_i die Gesamtkapitalrendite, die Standardabweichung, den Value at Risk oder den Conditional Value at Risk darstellen kann. Bevor das Regressionsmodell geschätzt wird, wird eine deskriptive Statistik der Variablen erstellt, die Korrelation der Variablen untereinander untersucht und es werden mögliche Zusammenhänge in einem Scatterplot bzw. Boxplot visualisiert.

Im ersten Schritt werden die Koeffizienten für den in der Regressionsgleichung dargestellten linearen Zusammenhang bei einem Signifikanzniveau von 5% geschätzt. Anschließend wird das Modell iterativ angepasst, um die Schätzgüte zu verbessern. Dazu werden zunächst unabhängige Variablen, die keinen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable haben, ausgehend vom höchsten p-Wert, sukzessive aus dem Modell entfernt. Danach wird überprüft ob neben den linearen Zusammenhängen auch nichtlineare Zusammenhänge zu beobachten sind. Dafür werden wiederum Scatterplots erstellt, die den Zusammenhang zwischen den unabhängigen Variablen und den Residuen darstellen. Beim Vorhandensein nichtlinearer Zusammenhänge wird außerdem die gemeinsame Signifikanz der Variablen ermittelt.

Bei jeder Iteration werden die Modellannahmen Homoskedastizität, Normalverteilung der Residuen und Multikollinearität sowie der Einfluss von Ausreißern überprüft. Die Homoskedastizitätsannahme wird dabei mit dem Breusch-Pagan-Test geprüft. Bei Heteroskedastizität werden nur robuste Schätzer verwendet. Die Normalverteilung der Residuen wird mit dem Shapiro Wilk Test überprüft. Um Multikollinearität zu erkennen, wird der Variance Inflation Factor mit einem Schwellenwert von zehn herangezogen. Außerdem wird, um einflussreiche Beobachtungen zu bestimmen, der Cooks Abstand ermittelt, wobei der Schwellenwert bei 0,5 liegt. Wenn der Wert über 0,5 liegt, wird die Beobachtung aus der Regression rausgenommen.

Der folgend dargestellte F-Test dient abschließend dazu im Rahmen der Varianzanalyse die Unterschiedlichkeit des Erklärungsgehalts der Modelle zur überprüfen:

$$F^* = \frac{\frac{SSE(R) - SSE(F)}{df_R - df_F}}{\frac{SSE(F)}{df_F}}$$

Während die Nullhypothese des F-Tests besagt, dass alle Koeffizienten gleich Null sind, lautet die Alternative, dass mindestens ein Koeffizient ungleich Null ist. Das Modell enthält demnach mindestens eine unabhängige Variable, die die abhängige Variable signifikant beeinflusst.

3.2.3.2 Erklärung der Korrelation

Folgt man den Empfehlungen der einschlägigen Literatur, sollten bei der Bildung von Portfolios Anlagetitel bevorzugt werden, die eine niedrige Korrelation aufweisen, um einen relativ hohen

Diversifikationseffekt zur Streuung des Risikos zu erreichen (Ernst & Schurer, 2015, S. 95). Die Frage ist also, welche Eigenschaften dazu führen, dass zwei Biogasanlagen eine niedrige Korrelation bzw. Kovarianz aufweisen. Oder anders ausgedrückt: Durch welche Variablen lässt sich die Korrelation bzw. Kovarianz erklären? Diese Frage soll im Rahmen einer Regressionsanalyse beantwortet werden. Aufgrund der besseren Interpretierbarkeit wird im Folgenden statt der Kovarianz die Korrelation als abhängige Variable im Regressionsmodell herangezogen.

Biogasanlagen unterscheiden sich in Ihren Eigenschaften, sodass sich die Hypothese ableiten lässt: Je stärker sich zwei Biogasanlagen in Ihren Eigenschaften unterscheiden, desto niedriger deren Korrelation.

Bei den unabhängigen Variablen werden die Differenzen zwischen zwei Biogasanlagen ermittelt um das „Ausmaß der Unterschiedlichkeit“ zu quantifizieren. Demnach enthält das Regressionsmodell die erklärenden Variablen:

- Differenz des Anlagevermögens [ΔAV]
- Differenz der Eigenkapitalquote [ΔEKQ]
- Altersdifferenz [ΔALT]
- Geografische Distanz [ΔSTO]
- Unterschied des Bundeslandes [ΔREG]
- Unterschied in der Rechtsform [$\Delta REFO$]

Bei den Variablen „Unterschied der Rechtsform“ sowie „Unterschied des Bundeslandes“ handelt es sich um nominal skalierte Variablen.

Das zu schätzende Regressionsmodell lässt sich mit folgender Formel beschreiben:

$$\rho_{ij} = \beta_0 + \beta_{AV} \log(\Delta AV)_{ij} + \beta_{EK} \Delta EKQ_{ij} + \beta_{Alt} \Delta ALT_{ij} + \beta_{STO} \Delta STO_{ij} + \beta_{REG} \Delta REG_i + \beta_{REFO} \Delta REFO_i + \varepsilon_i$$

Nachdem die Koeffizienten bei einem Signifikanzniveau von 5% geschätzt wurden, wird wie in Kapitel 3.2.3.1 beschrieben, auch dieses Modell iterativ angepasst, um die Schätzungsgüte zu verbessern. Bei jeder Iteration werden die Modellannahmen Homoskedastizität, Normalverteilung der Residuen und Multikollinearität sowie der Einfluss von Ausreißern überprüft.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Parameterschätzung

4.1.1 Erwartungswert und Stichprobenverteilung der Renditen

Stichprobenverteilung

In der oben beschriebenen Stichprobe liegen für jede der 180 Biogasanlagen-Gesellschaften zwischen fünf und 15 Renditebeobachtungen vor, die auf Normalverteilung zu testen sind. Ohne Berücksichtigung der Alphafehler-Kumulierung führt der Shapiro-Wilk-Test ausgehend von einem Signifikanzniveau α in Höhe von 5% zu dem Ergebnis, dass die Nullhypothese in 136 Fällen nicht verworfen werden kann. Das bedeutet, bei 136 Biogas-Gesellschaften kann von normalverteilten Renditen ausgegangen werden. In 44 Fällen wird die Nullhypothese abgelehnt. Es liegt demnach bei 44 von 180 Biogas-Gesellschaften keine Normalverteilung der Renditen vor.

Um eine mögliche Alphafehler-Kumulierung zu berücksichtigen, wird die Bonferroni-Korrektur angewandt. Nach Durchführung der Bonferroni-Korrektur kann die Nullhypothese in 176 Fällen beibehalten werden und wird bei nur 4 Biogas-Gesellschaften verworfen. Die Renditen der BGA16, BGA57, BGA69 und BGA81 sind nach der Bonferroni-Korrektur nicht normalverteilt.

Die Mittelwerte der Renditen von BGA16, BGA57, BGA69 und BGA81 liegen bei -0,22%, -3,58%, -10,33% und -9,52%. Die Dichteverteilungen der Renditen dieser Biogas-Gesellschaften ist in den Histogrammen in Abbildung 39 dargestellt.

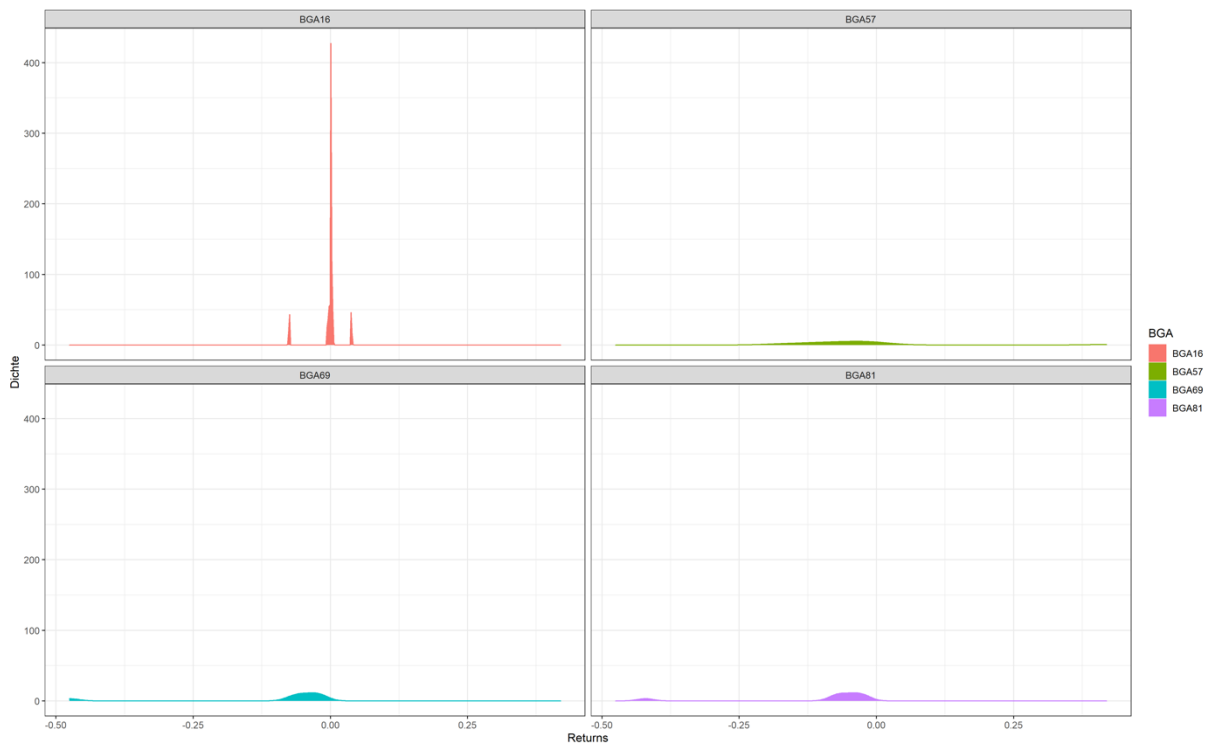


Abbildung 39: Verteilung der nicht normalverteilten Renditebeobachtungen
Quelle: Eigene Darstellung

Die Dichteverteilung der Renditen von BGA16 ist multimodal, während die Renditen der BGA57 eine leicht linkschiefe Verteilung aufweisen. Die Renditen der Biogasanlagen BGA69 und BGA81 weisen extreme Ausreißer nach unten auf, während die Renditen darüber hinaus normalverteilt scheinen.

Erwartungswert

Der Erwartungswert der Rendite wird auf Basis der historischen Daten für jede Biogas-Gesellschaft geschätzt. Insgesamt werden demnach 180 Erwartungswerte bzw. deren Schätzer ermittelt. Tabelle 20 zeigt einen Ausschnitt der historischen Renditen der Biogas-Gesellschaften BGA1 bis BGA10 (gesamte Matrix siehe Anhang 2 auf CD-ROM/USB-Stick). Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, konnten nicht für alle Biogas-Gesellschaften Jahresabschlussdaten über 15 Jahre erhoben werden. Daraus resultieren die leeren Zellen in der Tabelle (unvollständige Datenmatrix). Die letzte Spalte der Tabelle gibt den Mittelwert der historischen Renditen an, der als Schätzer für den Erwartungswert zukünftiger Renditen herangezogen wird.

Tabelle 20: Renditeerwartung der Biogasanlagen BGA1 bis BGA10

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	$E(R_i)=\mu$
BGA1	-1,48%	-2,40%	3,60%	-0,57%	-0,26%	-0,13%	0,97%	1,78%	1,94%	2,04%	2,41%	2,51%	6,95%	2,58%	0,34%	1,35%
BGA2		-2,34%	-1,45%	2,53%	4,65%	7,18%	13,41%	24,55%	26,19%	18,67%	18,37%	17,28%	15,40%	13,48%	14,59%	12,32%
BGA3							0,00%	1,06%	41,31%	-14,67%	-7,31%	-4,44%	-3,04%	-4,20%	-4,44%	0,47%
BGA4						-2,65%				10,16%	6,99%	9,37%	10,93%	11,82%	7,64%	7,75%
BGA5			2,50%	22,17%	4,06%	8,32%	16,92%	18,36%	47,40%	5,40%	4,41%	-1,15%	3,78%	-1,98%	-7,71%	9,42%
BGA6							-1,88%	-8,49%	-1,81%	-6,46%	-1,09%	-5,26%				-4,16%
BGA7						-2,47%	2,29%	5,28%	4,09%	-2,21%	0,28%	2,20%	1,44%	3,64%	4,88%	1,94%
BGA8						-1,37%	-8,81%	5,79%	5,53%	3,16%	7,49%	4,91%	3,21%	1,38%		2,36%
BGA9			0,02%	1,19%	13,67%	1,97%	2,47%	-0,38%	3,10%	4,08%	1,93%	5,14%	15,17%	-1,25%	3,45%	3,89%
BGA10		-1,93%	-3,28%	0,66%	-2,93%	-1,50%	-2,19%	5,12%	2,82%							-0,40%

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Ergebnisse der Schätzung der Erwartungswerte lassen sich in einer deskriptiven Statistik zusammenfassen (siehe Tabelle 21). Die 180 Biogas-Gesellschaften weisen im Mittelwert eine durchschnittliche historische Rendite in Höhe von 1,22% auf, wobei das Minimum bei einer negativen Rendite von -14,79% und das Maximum bei 20,14% liegt. Die Spannweite beträgt demnach 34,93 Prozentpunkte und die Standardabweichung 4,99%. Die Hälfte der Biogasanlagen der Stichprobe erzielen eine Rendite von mindestens 1,38%.

Tabelle 21: Deskriptive Statistik der Erwartungswerte für die Rendite

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Mittelwert	1,22%	4,99%	-14,79%	-1,58%	1,38%	4,16%	20,14%	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen historischen Netto-Gesamtkapitalrenditen und damit Schätzer der Erwartungswerte zeigt das Histogramm in Abbildung 40.

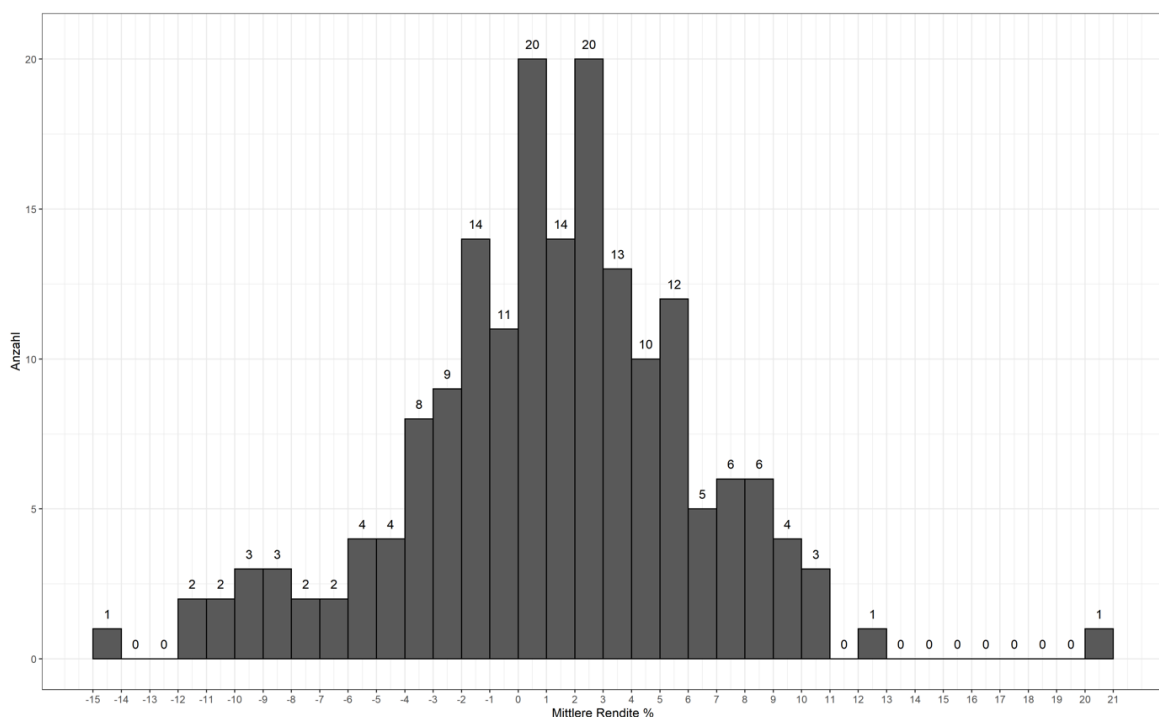


Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Erwartungswerte für die Rendite

Quelle: Eigene Darstellung

Die Renditeerwartung von 115 der 180 Biogasanlagen ist positiv. Das entspricht einem Anteil von 64%. Dementsprechend sind 65 Biogas-Gesellschaften mit einer negativen Rendite verbunden, was einem Anteil von 36% entspricht. Die Verteilung der Renditen ist nahezu symmetrisch. Die Extremwerte -14,79% und 20,14% weisen einen großen Abstand zur Hauptverteilung auf.

An dieser Stelle wurde nur ein Ausschnitt der erwarteten Renditen von 10 Biogas-Gesellschaften und darüber hinaus aggregierte Größen der 180 Biogas-Gesellschaften in der deskriptiven Statistik dargestellt. Eine Übersicht der erwarteten Renditen aller 180 Biogas-Gesellschaften ist dem Risiko-Rendite-Diagramm in Kapitel 4.2.1.1.1 zu entnehmen.

4.1.2 Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk als alternative Risikomaße

Standardabweichung

Analog zum Mittelwert wird für jede Biogas-Gesellschaft die Standardabweichung der historischen Renditen berechnet. Tabelle 22 entspricht nahezu Tabelle 20. Sie weist jedoch neben den historischen Renditen und deren Mittelwert in der letzten Spalte die Standardabweichungen beispielhaft für zehn der 180 untersuchten Biogas-Gesellschaften aus (gesamte Matrix siehe Anhang 3 auf CD-ROM/USB-Stick).

Tabelle 22: Standardabweichung der Renditen der Biogasanlagen BGA1 bis BGA10

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	$E(R_i) = \mu$	SD
BGA1	-1,48%	-2,40%	3,60%	-0,57%	-0,26%	-0,13%	0,97%	1,78%	1,94%	2,04%	2,41%	2,51%	6,95%	2,58%	0,34%	1,35%	2,28%
BGA2		-2,34%	-1,45%	2,53%	4,65%	7,18%	13,41%	24,55%	26,19%	18,67%	18,37%	17,28%	15,40%	13,48%	14,59%	12,32%	8,97%
BGA3							0,00%	1,06%	41,31%	-14,67%	-7,31%	-4,44%	-3,04%	-4,20%	-4,44%	0,47%	15,97%
BGA4						-2,65%				10,16%	6,99%	9,37%	10,93%	11,82%	7,64%	7,75%	4,90%
BGA5			2,50%	22,17%	4,06%	8,32%	16,92%	18,36%	47,40%	5,40%	4,41%	-1,15%	3,78%	-1,98%	-7,71%	9,42%	14,22%
BGA6							-1,88%	-8,49%	-1,81%	-6,46%	-1,09%	-5,26%				-4,16%	3,01%
BGA7						-2,47%	2,29%	5,28%	4,09%	-2,21%	0,28%	2,20%	1,44%	3,64%	4,88%	1,94%	2,73%
BGA8						-1,37%	-8,81%	5,79%	5,53%	3,16%	7,49%	4,91%	3,21%	1,38%		2,36%	4,94%
BGA9			0,02%	1,19%	13,67%	1,97%	2,47%	-0,38%	3,10%	4,08%	1,93%	5,14%	15,17%	-1,25%	3,45%	3,89%	5,01%
BGA10	-1,93%	-3,28%	0,66%	-2,93%	-1,50%	-2,19%	5,12%	2,82%								-0,40%	3,01%

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Ergebnisse der Risikoschätzung der 180 Biogas-Gesellschaften auf Basis der historischen Renditen werden in einer deskriptiven Statistik zusammengefasst (siehe Tabelle 23). Die Biogas-Gesellschaften weisen im Mittelwert eine durchschnittliche historische Standardabweichung in Höhe von 6,58% auf, wobei das Minimum bei 0,48% liegt und das Maximum bei 24,40%. Die Spannweite beträgt demnach 23,92 Prozentpunkte und die Standardabweichung 4,45%.

Tabelle 23: Deskriptive Statistik der Standardabweichungen der Renditen

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
SD	6,58%	4,45%	0,48%	3,47%	4,98%	8,86%	24,40%	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Es ist zu erkennen, dass der Mittelwert einen höheren Wert aufweist als der Median. Der Mittelwert ist demnach durch Ausreißer nach oben verzerrt. Daraus lässt sich schließen, dass einige Biogas-Gesellschaften sehr riskant sind. Die Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen der historischen Renditen der Biogas-Gesellschaften zeigt das Histogramm in Abbildung 41.

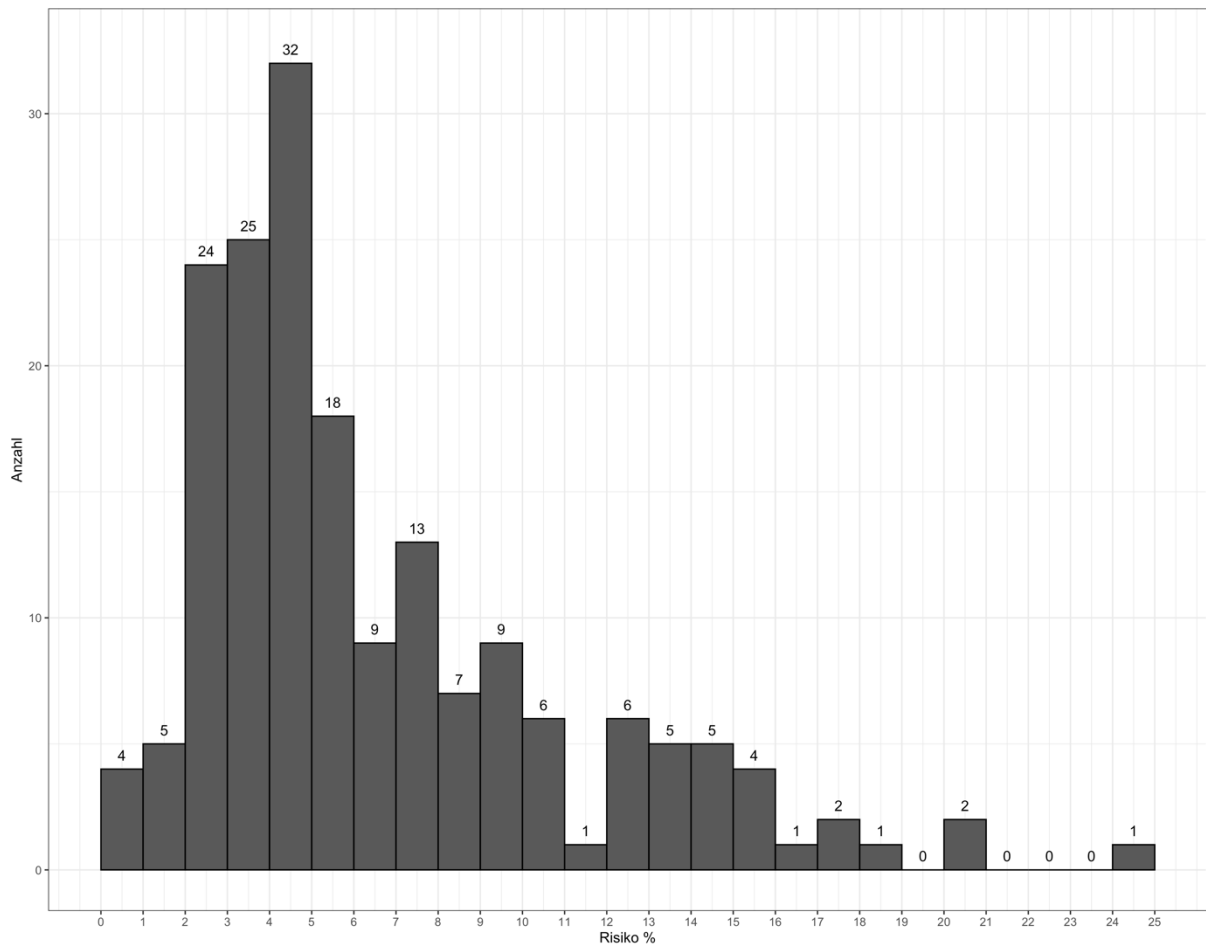


Abbildung 41: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen der historischen Renditen
Quelle: Eigene Darstellung

Die Standardabweichung kann per Definition keine negativen Werte annehmen. Das Histogramm zeigt eine rechtsschiefe Verteilung der Standardabweichungen. Nur neun Biogas-Gesellschaften weisen Standardabweichungen zwischen null und 2% auf. Am häufigsten kommen Standardabweichungen zwischen 2% und 5% vor, nämlich in 81 von 180 Fällen. Die Standardabweichungen von 50% der Biogas-Gesellschaften liegen demnach zwischen null und 5%, während die anderen 50% der Biogas-Gesellschaften Standardabweichungen zwischen 5% und 25% aufweisen.

Bei der Standardabweichung handelt es sich um ein symmetrisches Risikomaß. Der Value at Risk dagegen berücksichtigt nur negative Abweichungen vom Erwartungswert.

Value at Risk

Als alternatives Risikomaß wird der Value at Risk bei einem Wahrscheinlichkeitsniveau von 5% für alle 180 Biogas-Gesellschaften berechnet. Tabelle 24 entspricht ebenfalls nahezu der Tabelle 20, jedoch weist sie neben den historischen Renditen und dem Erwartungswert in der letzten Spalte den Value at Risk beispielhaft für zehn der 180 untersuchten Biogas-Gesellschaften aus (gesamte Matrix siehe Anhang 4 auf CD-ROM/USB-Stick).

Tabelle 24: Value at Risk der Renditen der Biogasanlagen BGA1 bis BGA10

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	$E(R_i) = \mu$	VaR
BGA1	-1,48%	-2,40%	3,60%	-0,57%	-0,26%	-0,13%	0,97%	1,78%	1,94%	2,04%	2,41%	2,51%	6,95%	2,58%	0,34%	1,35%	2,40%
BGA2		-2,34%	-1,45%	2,53%	4,65%	7,18%	13,41%	24,55%	26,19%	18,67%	18,37%	17,28%	15,40%	13,48%	14,59%	12,32%	2,43%
BGA3							0,00%	1,06%	41,31%	-14,67%	-7,31%	-4,44%	-3,04%	-4,20%	-4,44%	0,47%	25,79%
BGA4						-2,65%				10,16%	6,99%	9,37%	10,93%	11,82%	7,64%	7,75%	0,30%
BGA5			2,50%	22,17%	4,06%	8,32%	16,92%	18,36%	47,40%	5,40%	4,41%	-1,15%	3,78%	-1,98%	-7,71%	9,42%	13,97%
BGA6							-1,88%	-8,49%	-1,81%	-6,46%	-1,09%	-5,26%				-4,16%	9,12%
BGA7						-2,47%	2,29%	5,28%	4,09%	-2,21%	0,28%	2,20%	1,44%	3,64%	4,88%	1,94%	2,55%
BGA8						-1,37%	-8,81%	5,79%	5,53%	3,16%	7,49%	4,91%	3,21%	1,38%		2,36%	5,77%
BGA9			0,02%	1,19%	13,67%	1,97%	2,47%	-0,38%	3,10%	4,08%	1,93%	5,14%	15,17%	-1,25%	3,45%	3,89%	4,36%
BGA10	-1,93%	-3,28%	0,66%	-2,93%	-1,50%	-2,19%	5,12%	2,82%								-0,40%	5,35%

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Ergebnisse der Berechnung des Value at Risk der 180 Biogas-Gesellschaften werden in einer deskriptiven Statistik zusammengefasst (siehe Tabelle 25). Die Biogas-Gesellschaften weisen im Mittelwert einen Value at Risk in Höhe von 9,62% auf. Im Durchschnitt wird in 95% der Fälle ein Verlust von 9,62% nicht überschritten. Das Minimum liegt bei -7,65%. Demnach überschreitet diese Biogas-Gesellschaft in 95% der Fälle (Jahre) eine Rendite in Höhe von 7,65%. Das Maximum liegt bei einem Verlust in Höhe von 40,32%. Die Spannweite des Value at Risk beträgt 47,96 Prozentpunkte und die Standardabweichung 8,96%.

Tabelle 25: Deskriptive Statistik des Value at Risk der Renditen

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
VaR	9,62%	8,96%	-7,65%	3,52%	6,59%	13,48%	40,32%	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Median liegt mit 6,59% unter dem Mittelwert. Daraus lässt sich folgern, dass der Mittelwert durch Ausreißer verzerrt ist und einzelne Biogas-Gesellschaften durch ein hohes Risiko gekennzeichnet sind. Die Häufigkeitsverteilung der Werte für den Value at Risk ist im folgenden Histogramm in Abbildung 42 dargestellt.

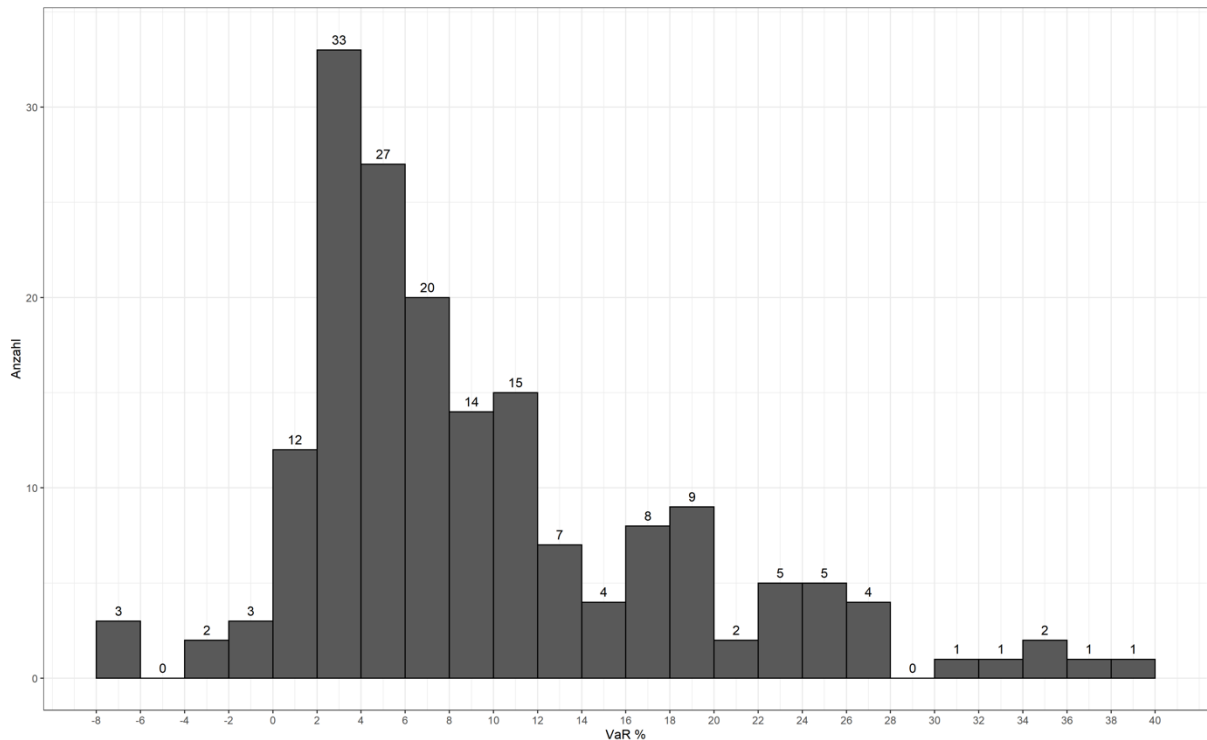


Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung des Value at Risk der Renditen
Quelle: Eigene Darstellung

Die Werte für den Value at Risk der Biogas-Gesellschaften folgen einer rechtsschiefen Verteilung. Nur acht Biogas-Gesellschaften weisen einen negativen Value at Risk auf. Das bedeutet, dass diese Biogas-Gesellschaften in 95% der Fälle eine positive Rendite erzielen. Die übrigen 172 Biogas-Gesellschaften weisen einen positiven Value at Risk auf und haben somit eine höhere Verlustwahrscheinlichkeit. Am häufigsten kommt ein Value at Risk zwischen 2% und 8% vor, nämlich in 80 von 180 Fällen.

Der Value at Risk beschreibt die Wahrscheinlichkeit ein bestimmtes Verlustniveau nicht zu überschreiten. Er trifft jedoch keine Aussage mit welcher Verlusthöhe zu rechnen ist, wenn der Value at Risk überschritten wird. Eine Aussage über die durchschnittliche Verlusthöhe bei Überschreiten des Value at Risk trifft der Conditional Value at Risk.

Conditional Value at Risk

Als Ergänzung zum Value at Risk mit einem Wahrscheinlichkeitsniveau von 5% wird für alle 180 Biogas-Gesellschaften der Conditional Value at Risk berechnet. Auch der Conditional Value at Risk wird auf Basis der in Tabelle 20 dargestellten Renditen berechnet, sodass Tabelle 26 neben den historischen Renditen und dem Erwartungswert in der letzten Spalte den Conditional Value at Risk beispielhaft für zehn der 180 untersuchten Biogas-Gesellschaften ausweist (gesamte Matrix siehe Anhang 5 auf CD-ROM/USB-Stick).

Tabelle 26: Conditional Value at Risk der Renditen der Biogasanlagen BGA1 bis BGA10

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	$E(R_i) = \mu$	CVaR	
BGA1	-1,48%	-2,40%	3,60%	-0,57%	-0,26%	-0,13%	0,97%	1,78%	1,94%	2,04%	2,41%	2,51%	6,95%	2,58%	0,34%	1,35%	3,36%	
BGA2		-2,34%	-1,45%	2,53%	4,65%	7,18%	13,41%	24,55%	26,19%	18,67%	18,37%	17,28%	15,40%	13,48%	14,59%	12,32%	6,18%	
BGA3								0,00%	1,06%	41,31%	-14,67%	-7,31%	-4,44%	-3,04%	-4,20%	-4,44%	0,47%	32,47%
BGA4						-2,65%				10,16%	6,99%	9,37%	10,93%	11,82%	7,64%	7,75%	2,35%	
BGA5			2,50%	22,17%	4,06%	8,32%	16,92%	18,36%	47,40%	5,40%	4,41%	-1,15%	3,78%	-1,98%	-7,71%	9,42%	19,91%	
BGA6							-1,88%	-8,49%	-1,81%	-6,46%	-1,09%	-5,26%					-4,16%	10,37%
BGA7						-2,47%	2,29%	5,28%	4,09%	-2,21%	0,28%	2,20%	1,44%	3,64%	4,88%	1,94%	3,69%	
BGA8						-1,37%	-8,81%	5,79%	5,53%	3,16%	7,49%	4,91%	3,21%	1,38%		2,36%	7,84%	
BGA9			0,02%	1,19%	13,67%	1,97%	2,47%	-0,38%	3,10%	4,08%	1,93%	5,14%	15,17%	-1,25%	3,45%	3,89%	6,45%	
BGA10	-1,93%	-3,28%	0,66%	-2,93%	-1,50%	-2,19%	5,12%	2,82%								-0,40%	6,61%	

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Ergebnisse der Berechnung des Conditional Value at Risk der 180 Biogas-Gesellschaften werden in einer deskriptiven Statistik zusammengefasst (siehe Tabelle 27). Die Biogas-Gesellschaften weisen im Mittelwert einen Conditional Value at Risk in Höhe von 12,38% auf. Wenn der Value at Risk überschritten wird, beträgt die Verlusthöhe im Durchschnitt 12,38%. Das Minimum liegt bei -6,30%. Bei dieser Biogas-Gesellschaft erzielt ein Investor bei Überschreitung des Value at Risk im Durchschnitt eine positive Rendite in Höhe von 6,30%. Im Maximum liegt der Conditional Value at Risk bei einem erwarteten Verlust in Höhe von 48,25%. Die Spannweite des Conditional Value at Risk beträgt 54,55 Prozentpunkte und die Standardabweichung 10,56%.

Tabelle 27: Deskriptive Statistik des Conditional Value at Risk der Renditen

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
cVaR	12,38%	10,56%	-6,30%	5,21%	8,40%	17,51%	48,25%	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Median liegt mit 8,40% unter dem Mittelwert. Daraus lässt sich folgern, dass der Mittelwert durch Ausreißer nach oben verzerrt ist und einzelne Biogas-Gesellschaften durch einen hohen Conditional Value at Risk gekennzeichnet sind. Die Häufigkeitsverteilung der Werte für den Conditional Value at Risk ist im folgenden Histogramm in Abbildung 43 dargestellt.

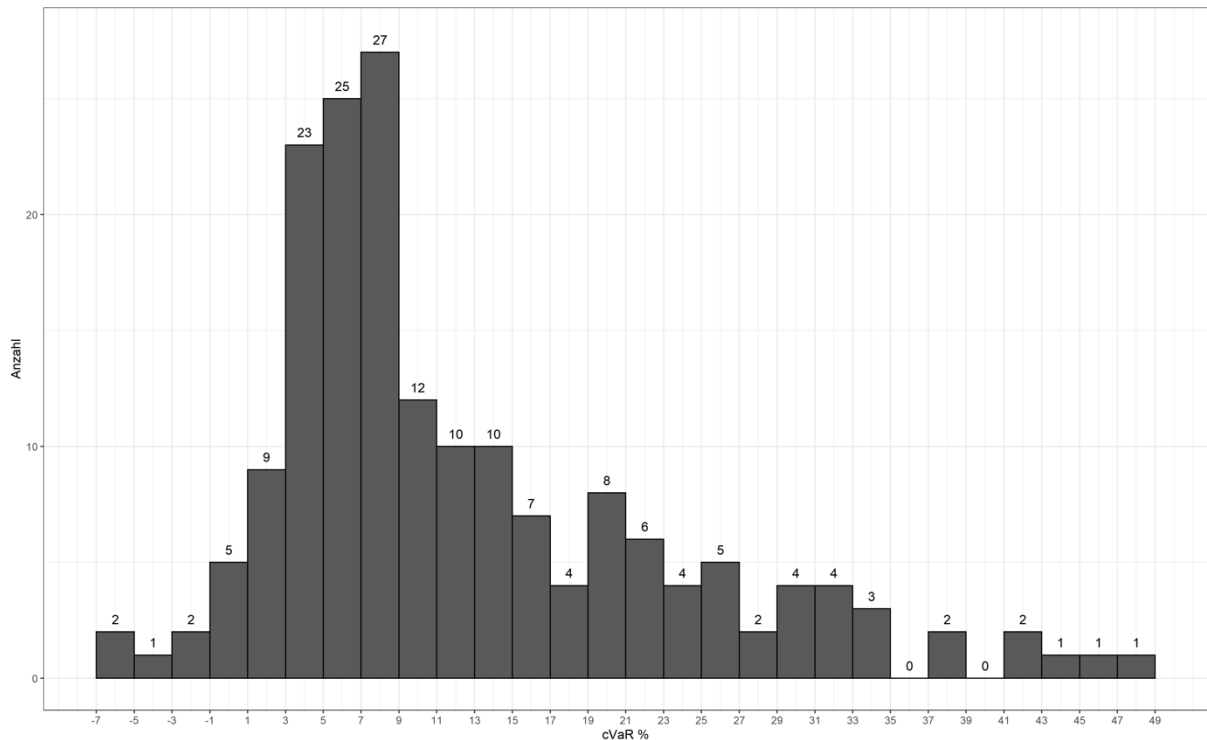


Abbildung 43: Häufigkeitsverteilung des Conditional Value at Risk der Renditen
Quelle: Eigene Darstellung

Auch die Werte für den Conditional Value at Risk der Biogas-Gesellschaften folgen einer rechtsschiefen Verteilung. Nur fünf Biogas-Gesellschaften weisen einen negativen Conditional Value at Risk auf. Diese Biogas-Gesellschaften erzielen im Durchschnitt eine positive Rendite, wenn der Value at Risk überschritten wird. Die übrigen 175 Biogas-Gesellschaften weisen einen positiven Conditional Value at Risk auf und sind im Durchschnitt mit einem Verlust verbunden, wenn das Quantil überschritten wird. Am häufigsten kommt ein Conditional Value at Risk zwischen 3% und 9% vor, nämlich bei 75 von 180 Biogas-Gesellschaften.

An dieser Stelle wurde nur ein Ausschnitt der erwarteten Risiken von zehn Biogas-Gesellschaften und darüber hinaus aggregierte Größen der 180 Biogas-Gesellschaften in der deskriptiven Statistik dargestellt. Eine Übersicht der erwarteten Risiken aller 180 Biogas-Gesellschaften ist den Risiko-Rendite-Diagrammen in Kapitel 4.2.1.1 zu entnehmen.

4.1.3 Kovarianz- und Korrelationsmatrix

4.1.3.1 Stichprobenkovarianz und -korrelation bei Anwendung von „Pairwise deletion“

Pairwise deletion

Die Tabelle 20 in Kapitel 4.1.1 zeigt einen Ausschnitt der historischen Renditen der Biogas-Gesellschaften. Zu erkennen ist, dass die Datenmatrix unvollständig ist. Für BGA1 z.B. liegen 15 Werte vor, während es bei BGA3 nur neun sind. In Kapitel 3.2.1.3.2 ist beschrieben, dass für den Umgang mit fehlenden Werten die Methode „Pairwise deletion“ angewandt wird und

somit für die Berechnung der Kovarianzmatrix unterschiedliche Teilstichproben verwendet werden. Die Größe der Teilstichproben entspricht der Anzahl paarweiser Beobachtungen zweier Biogas-Gesellschaften. Da die Anzahl paarweiser Beobachtungen die Schätzgüte der Kovarianzen beeinflusst, wird zunächst deren Häufigkeitsverteilung im Histogramm der Abbildung 44 dargestellt.

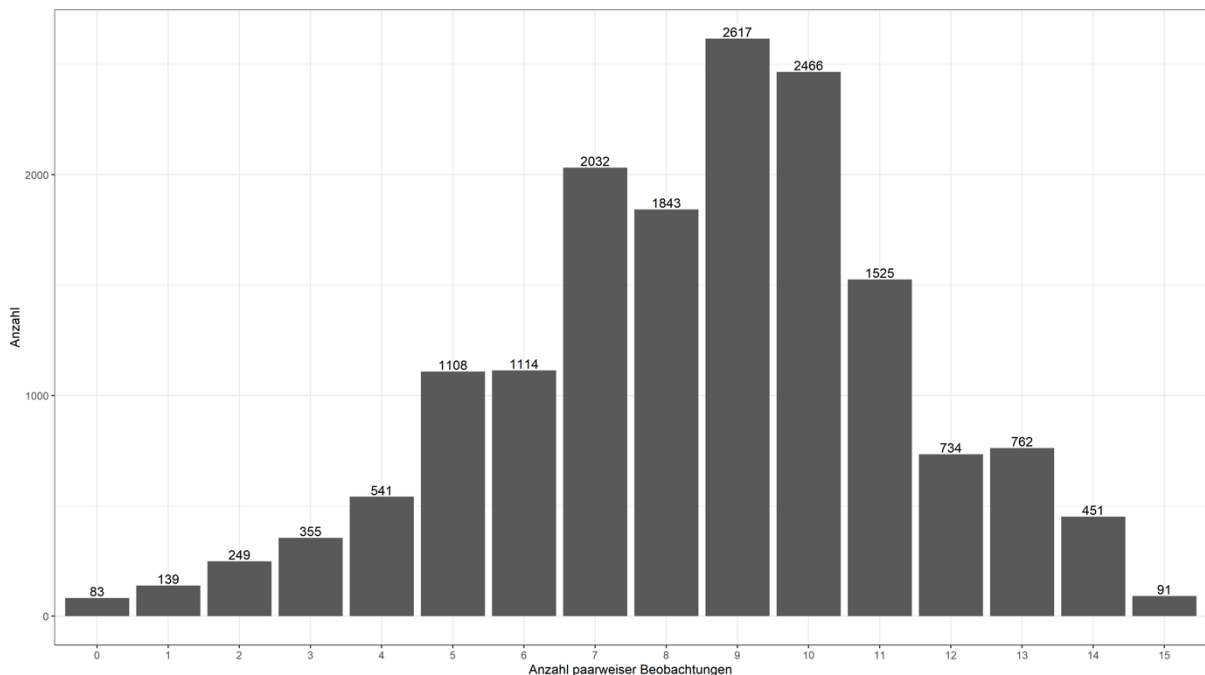


Abbildung 44: Häufigkeitsverteilung paarweiser Beobachtungen der Biogas-Gesellschaften
Quelle: Eigene Darstellung

Bei 180 Biogas-Gesellschaften könnten bei einer vollständigen Datenmatrix maximal 16.110 Kovarianzen berechnet werden. Die vorliegende Datenmatrix ist jedoch unvollständig, was zu einer unterschiedlichen Anzahl an paarweisen Beobachtungen führt. Der gewogene Mittelwert liegt bei 8,47 paarweisen Beobachtungen. Am häufigsten kommen neun paarweise Beobachtungen vor. Der Maximalwert von 15 paarweisen Beobachtungen (vollständige Datensätze) kommt 91-mal vor. In 222 Fällen kann keine Kovarianz berechnet werden, da die Anzahl paarweiser Beobachtungen null oder eins beträgt. Dem entsprechend können 15.888 Kovarianzen berechnet werden. Diese werden in einer Matrix dargestellt.

Kovarianzmatrix

Tabelle 28 zeigt einen Ausschnitt (BGA1 bis BGA15, gesamte Matrix siehe Anhang 6 auf CD-ROM/USB-Stick) der Kovarianzmatrix der Biogas-Gesellschaften. Auf der Diagonalen sind die Varianzen dargestellt. Oberhalb der Diagonalen ist die Anzahl paarweiser Beobachtungen angegeben, auf denen die Schätzung basiert und unterhalb der Diagonalen, die auf Basis der in Kap 3.2.1.3.1 beschriebenen Formel geschätzten Kovarianzen. BGA4 und BGA10 weisen nur eine paarweise Beobachtung auf, sodass keine Kovarianz berechnet werden kann. Die Matrix weist an dieser Stelle einen fehlenden Wert auf.

Tabelle 28: Anzahl paarweiser Beobachtungen und Kovarianzen der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15

	BGA1	BGA2	BGA3	BGA4	BGA5	BGA6	BGA7	BGA8	BGA9	BGA10	BGA11	BGA12	BGA13	BGA14	BGA15
BGA1	0,0005	14	9	7	13	6	10	9	13	8	14	9	10	13	10
BGA2	0,0008	0,0080	9	7	13	6	10	9	13	8	14	9	10	13	10
BGA3	-0,0003	0,0047	0,0255	6	9	6	9	8	9	3	9	4	8	8	9
BGA4	0,0007	0,0014	0,0001	0,0024	7	3	7	6	7	1	7	3	7	7	7
BGA5	-0,0005	0,0040	0,0233	-0,0012	0,0202	6	10	9	13	7	13	8	10	12	10
BGA6	0,0000	-0,0004	0,0022	-0,0005	0,0015	0,0009	6	6	6	3	6	4	5	5	6
BGA7	0,0000	0,0007	0,0018	0,0007	0,0008	-0,0001	0,0007	9	10	4	10	5	9	9	10
BGA8	0,0003	0,0018	0,0010	0,0008	0,0003	-0,0004	0,0002	0,0024	9	4	9	5	8	8	9
BGA9	0,0003	-0,0002	-0,0005	0,0006	-0,0012	0,0001	-0,0002	0,0002	0,0025	7	13	8	10	12	10
BGA10	0,0001	0,0027	0,0020		0,0032	-0,0011	0,0009	0,0022	-0,0006	0,0009	8	7	4	7	4
BGA11	0,0002	-0,0002	-0,0042	0,0012	-0,0036	0,0003	-0,0003	0,0007	0,0005	-0,0005	0,0016	9	10	13	10
BGA12	-0,0011	-0,0024	-0,0003	0,0020	0,0053	-0,0043	-0,0013	-0,0033	0,0012	0,0009	0,0003	0,0252	5	8	5
BGA13	-0,0013	-0,0013	-0,0001	-0,0048	0,0009	0,0002	-0,0009	-0,0018	-0,0021	-0,0007	-0,0014	0,0010	0,0085	10	9
BGA14	-0,0007	-0,0007	-0,0004	-0,0013	0,0010	0,0001	-0,0001	-0,0005	-0,0011	0,0000	-0,0007	-0,0004	0,0029	0,0020	9
BGA15	0,0001	0,0008	0,0012	0,0006	0,0011	-0,0002	0,0002	0,0006	-0,0002	0,0010	0,0000	0,0008	-0,0011	-0,0001	0,0004

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Ergebnisse der Kovarianzschätzung aller Biogas-Gesellschaften werden in einer deskriptiven Statistik zusammengefasst (siehe Tabelle 29). In der deskriptiven Statistik wird unterschieden, ob die Kovarianzen auf Basis von mindestens zwei, fünf oder zehn paarweisen Beobachtungen berechnet wurden. So kann der Einfluss der Anzahl paarweiser Beobachtungen auf das Vorkommen von Extremwerten durch Schätzfehler untersucht werden.

Tabelle 29: Deskriptive Statistik der Kovarianzen bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
≥ 2 paarw. Beobachtungen	0,00025	0,00255	-0,06950	-0,00048	0,00010	0,00087	0,03212	15.888
≥ 5 paarw. Beobachtungen	0,00030	0,00257	-0,06950	-0,00045	0,00012	0,00090	0,03212	14.743
≥ 10 paarw. Beobachtungen	0,00066	0,00268	-0,01183	-0,00035	0,00023	0,00117	0,03041	6.029

Quelle: Eigene Berechnungen

Zu erkennen ist, dass mit einer zunehmenden Anzahl an paarweisen Beobachtungen das Minimum steigt und das Maximum sinkt. Die Verteilung zieht sich mit zunehmender Anzahl an Beobachtungen zusammen. Wobei das Minimum stärker steigt, als das Maximum sinkt. Das 25%-Quantil steigt ebenfalls mit zunehmender Anzahl an paarweisen Beobachtungen, während das 75%-Quantil im Gegensatz zu den maximalen Extremwerten steigt. Der Mittelwert steigt, bei nahezu unveränderter Standardabweichung, da vorwiegend die negativen Werte mit zunehmender Anzahl an Beobachtungen „herausfallen“.

Die Histogramme in Abbildung 45 zeigen die Häufigkeitsverteilung der Kovarianzen bei mindestens zwei, mindestens fünf und mindestens zehn paarweisen Beobachtungen.

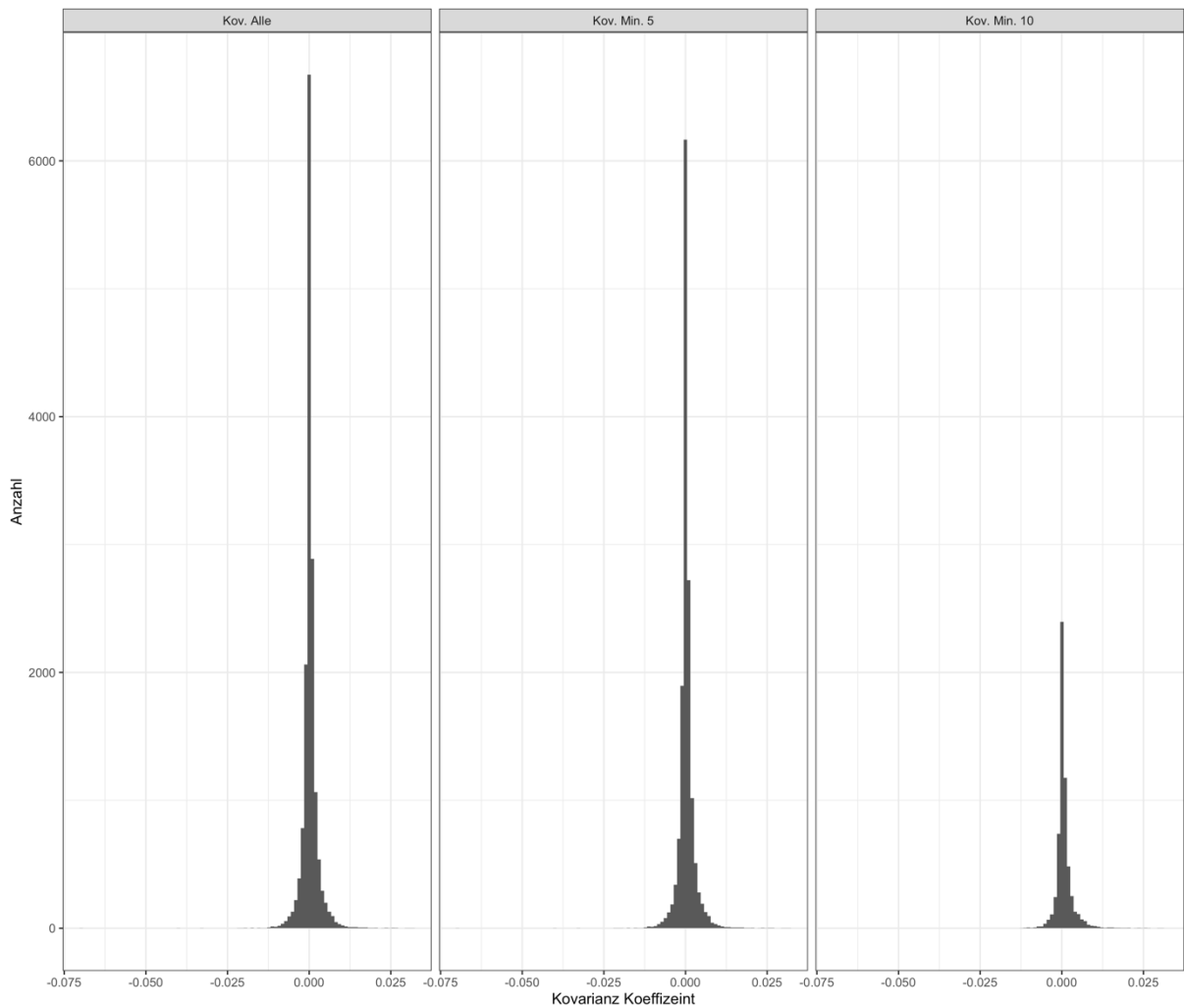


Abbildung 45: Häufigkeitsverteilung der Kovarianzen bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

Quelle: Eigene Darstellung

Kovarianzen können in Abhängigkeit von den Ausgangsdaten Werte von der negativen bis zur positiven Unendlichkeit annehmen. Deshalb ist Kovarianz als nicht standardisiertes Maß des Zusammenhangs nur schwer zu interpretieren. Auf Basis der Kovarianzen wurden Korrelationskoeffizienten geschätzt, die durch die Standardisierung besser zu interpretieren sind. Im Folgenden werden die Korrelationskoeffizienten der Renditen der Biogas-Gesellschaften dargestellt.

Korrelationsmatrix

Tabelle 30 zeigt einen Ausschnitt (BGA1 bis BGA15) der Korrelations-Matrix der Biogas-Gesellschaften. Anstelle von Einsen sind auf der Diagonalen die Anzahl an Beobachtungen der jeweiligen Biogas-Gesellschaft angegeben. Oberhalb der Diagonalen ist wieder die Anzahl paarweiser Beobachtungen angegeben und unterhalb der Diagonalen die auf Basis der in Kapitel 3.2.1.3.1 beschriebenen Formel geschätzten Korrelationskoeffizienten. BGA4 und

BGA10 weisen nur eine paarweise Beobachtung auf, sodass keine Korrelation berechnet werden kann. Die Matrix weist an dieser Stelle einen fehlenden Wert auf.

Tabelle 30: Anzahl paarweiser Beobachtungen und Korrelationskoeffizienten der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15

	BGA1	BGA2	BGA3	BGA4	BGA5	BGA6	BGA7	BGA8	BGA9	BGA10	BGA11	BGA12	BGA13	BGA14	BGA15
BGA1	15	14	9	7	13	6	10	9	13	8	14	9	10	13	10
BGA2	0,4181	14	9	7	13	6	10	9	13	8	14	9	10	13	10
BGA3	-0,0853	0,6399	9	6	9	6	9	8	9	3	9	4	8	8	9
BGA4	0,6095	0,7441	0,0704	7	7	3	7	6	7	1	7	3	7	7	7
BGA5	-0,1614	0,3440	0,8813	-0,4603	13	6	10	9	13	7	13	8	10	12	10
BGA6	-0,1150	-0,2666	0,3645	-0,9996	0,2775	6	6	6	6	3	6	4	5	5	6
BGA7	0,0228	0,4816	0,4705	0,5204	0,1938	-0,1097	10	9	10	4	10	5	9	9	10
BGA8	0,3341	0,6218	0,1189	0,4894	0,0363	-0,2422	0,1656	9	9	4	9	5	8	8	9
BGA9	0,3218	-0,0539	-0,0679	0,2555	-0,1616	0,1932	-0,1881	0,0734	13	7	13	8	10	12	10
BGA10	0,2015	0,8012	0,2300		0,6664	-0,7374	0,7688	0,9014	-0,4012	8	8	7	4	7	4
BGA11	0,2454	-0,0681	-0,5438	0,9082	-0,5997	0,1617	-0,2333	0,3069	0,2236	-0,5087	14	9	10	13	10
BGA12	-0,3876	-0,1519	-0,0048	0,1174	0,2051	-0,8306	-0,2567	-0,2824	0,1725	0,4236	0,0492	9	5	8	5
BGA13	-0,6868	-0,2430	-0,0399	-0,8930	0,1277	0,3640	-0,3390	-0,3675	-0,4215	-0,1684	-0,3351	0,0537	10	10	9
BGA14	-0,6441	-0,1807	-0,1613	-0,4648	0,2414	0,1061	-0,0758	-0,1647	-0,4448	-0,0505	-0,4040	-0,3043	0,6224	13	9
BGA15	0,2345	0,6979	0,4020	0,7399	0,3515	-0,2825	0,3920	0,6013	-0,2048	0,9167	0,0050	0,1738	-0,5897	-0,1280	10

Quelle: Eigene Berechnungen

Wie bei der Kovarianz wird in der deskriptiven Statistik unterschieden, ob die Korrelationskoeffizienten auf Basis von mindestens zwei, fünf oder zehn paarweisen Beobachtungen berechnet wurden. So kann der Einfluss der Anzahl paarweiser Beobachtungen auf das Vorkommen von Extremwerten wie 1 und -1 durch Schätzfehler untersucht werden.

Tabelle 31 zeigt die deskriptive Statistik der Korrelationskoeffizienten unter Berücksichtigung der Mindestanzahl an paarweisen Beobachtungen, die der Schätzung zugrunde liegen. Der Mittelwert der Korrelationskoeffizienten liegt bei 0,067, bei 0,078 bzw. bei 0,126. Er liegt in allen drei Fällen nahe null und ist schwach positiv. Auch der Median ist in allen drei Fällen schwach positiv und liegt nahe am Mittelwert. Die Standardabweichung sinkt bei zunehmender Anzahl an paarweisen Beobachtungen. Das bedeutet, die Streuung der Korrelationskoeffizienten um den Mittelwert nimmt ab. Auch das 25%-Quantil wird größer und nähert sich einem Wert von null.

Tabelle 31: Deskriptive Statistik der Korrelationen bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
≥ 2 paarw. Beobachtung	0,06685	0,45543	-1,00000	-0,25865	0,07486	0,40892	1,00000	15.888
≥ 5 paarw. Beobachtung	0,07786	0,42312	-0,99488	-0,23546	0,08213	0,39952	0,99205	14.743
≥ 10 paarw. Beobachtung	0,12553	0,38385	-0,94612	-0,16416	0,11979	0,41900	0,98190	6.029

Quelle: Eigene Berechnungen

Zu erkennen ist, dass die Extremwerte -1 und 1 nur vorkommen, wenn Korrelationskoeffizienten berücksichtigt werden, die auf nur zwei paarweisen Beobachtungen basieren. Bei mindestens fünf bzw. mindestens zehn paarweisen Beobachtungen kommen diese Extremwerte nicht vor. Eine mögliche Erklärung ist, dass diese Extremwerte auf Schätzfehlern bei einer kleinen

Teilstichprobe beruhen. Dennoch kommen in allen drei Fällen stark negative sowie stark positive Korrelationen vor.

Die Histogramme in Abbildung 46 zeigen die Häufigkeitsverteilung der Korrelationskoeffizienten bei mindestens zwei, mindestens fünf und mindestens zehn paarweisen Beobachtungen. Die Histogramme lassen ebenfalls erkennen, dass Extremwerte mit einer zunehmenden Anzahl an paarweisen Beobachtungen abnehmen.

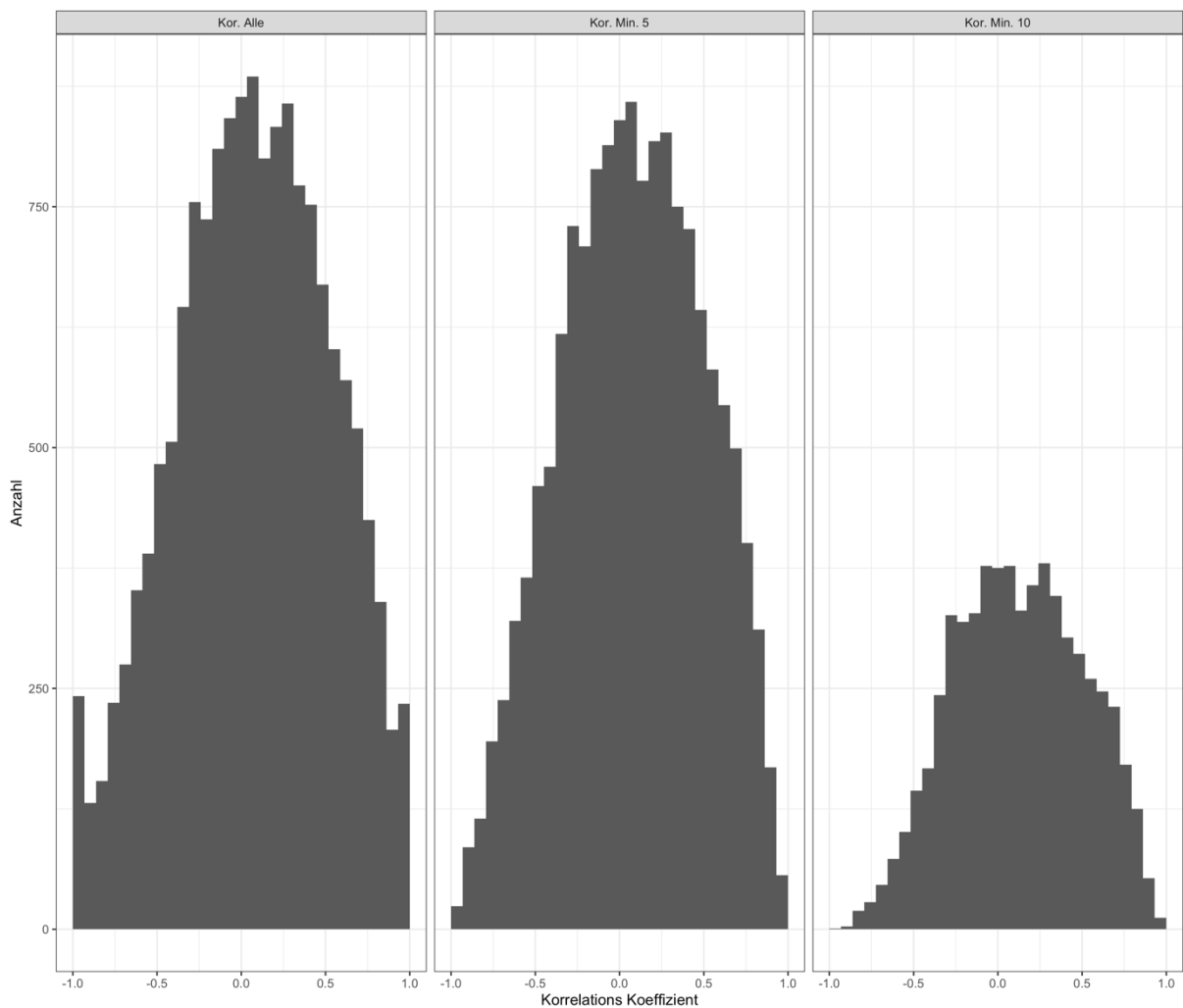


Abbildung 46: Häufigkeitsverteilung der Korrelationen bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 32 zeigt die Anzahl an Biogas-Gesellschaften, die stark negativ oder negativ korrelieren, unkorreliert sind, sowie positiv oder stark positiv korrelieren. Ebenfalls ist die Anzahl an paarweisen Beobachtungen berücksichtigt.

Tabelle 32: Anzahl und prozentualer Anteil der Korrelationen je Kategorie bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

	stark negativ (-1,0 ≤ p < -0,6)		negativ (-0,6 ≤ p < -0,2)		unkorreliert (-0,2 ≤ p < 0,2)		positiv (0,2 ≤ p < 0,6)		stark positiv (0,6 ≤ p ≤ 1,0)		N
≥ 2 paarw. Beobachtung	1.310	[8,25%]	3.290	[20,71%]	4.831	[30,41%]	4.285	[26,97%]	2.172	[13,67%]	15.888
≥ 5 paarw. Beobachtung	753	[5,52%]	2.899	[21,26%]	4.430	[32,49%]	3.878	[28,44%]	1.675	[12,28%]	13.635
≥ 10 paarw. Beobachtung	74	[2,08%]	661	[18,55%]	1.218	[34,18%]	1.114	[31,27%]	496	[13,92%]	3.563

Quelle: Eigene Berechnungen

Mit zunehmender Anzahl an paarweisen Beobachtungen nehmen stark negative Korrelationen im Verhältnis ab, während positive Korrelationen zunehmen. Korrelationen nahe null nehmen ebenfalls mit zunehmender Anzahl paarweiser Beobachtungen zu.

Die geschätzte Kovarianz- und Korrelationsmatrix ist nicht vollständig. Sie weist 222 fehlende Werte auf, da die Anzahl an paarweisen Beobachtungen in diesen Fällen null oder eins beträgt. Für eine unvollständige Matrix können die Eigenwerte nicht ermittelt und dadurch auch die Definitheit nicht bestimmt werden.

Außerdem hat die vorstehende Analyse gezeigt, dass die Kovarianzschätzung mit Schätzfehlern, insbesondere durch kleine Teilstichproben, verbunden ist. Diese Schätzfehler können die Ursache für Extremwerte sein, die nicht der Wahrheit entsprechen und unter Umständen Investoren zu Fehlentscheidungen veranlassen. Zur Reduzierung von Schätzfehlern wird die Methode der Shrinkage Estimation angewandt.

4.1.3.2 Ergebnisse der Shrinkage Estimation zur Reduzierung von Schätzfehlern

Im Rahmen der Shrinkage Estimation wird zunächst der strukturierte Schätzer F ermittelt. Die gemeinsame konstante Korrelation, also der Mittelwert der paarweisen Stichprobenkorrelationen \bar{r} beträgt 0,0669. Im Folgenden wird ein Ausschnitt der strukturierten Matrix dargestellt (siehe Tabelle 33). Die Werte auf der Diagonalen entsprechen den Varianzen σ_{ii} . Oberhalb der Diagonalen enthält die Matrix die Wurzel aus dem Produkt der Varianzen $\sqrt{\sigma_{ii}\sigma_{jj}}$. Unterhalb der Diagonalen ist die strukturierte Matrix F mit $f_{ij} = \bar{r}\sqrt{\sigma_{ii}\sigma_{jj}}$ dargestellt. Die Matrix ist vollständig und enthält keine fehlenden Werte, da das Produkt der Standardabweichungen und f_{ij} berechnet werden kann, wenn keine oder nur eine paarweise Beobachtung vorliegt.

Tabelle 33: Strukturierte Matrix F der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15

	BGA1	BGA2	BGA3	BGA4	BGA5	BGA6	BGA7	BGA8	BGA9	BGA10	BGA11	BGA12	BGA13	BGA14	BGA15
BGA1	0,00052	0,00205	0,00365	0,00112	0,00325	0,00069	0,00062	0,00113	0,00115	0,00069	0,00092	0,00363	0,00210	0,00103	0,00047
BGA2	0,00014	0,00805	0,01433	0,00439	0,01276	0,00270	0,00245	0,00444	0,00450	0,00270	0,00360	0,01425	0,00827	0,00406	0,00184
BGA3	0,00024	0,00096	0,02550	0,00782	0,02271	0,00481	0,00436	0,00790	0,00801	0,00481	0,00641	0,02536	0,01472	0,00723	0,00327
BGA4	0,00007	0,00029	0,00052	0,00240	0,00696	0,00147	0,00134	0,00242	0,00246	0,00147	0,00197	0,00778	0,00451	0,00222	0,00100
BGA5	0,00022	0,00085	0,00152	0,00047	0,02022	0,00428	0,00388	0,00703	0,00713	0,00428	0,00571	0,02258	0,01310	0,00644	0,00292
BGA6	0,00005	0,00018	0,00032	0,00010	0,00029	0,00091	0,00082	0,00149	0,00151	0,00091	0,00121	0,00478	0,00277	0,00136	0,00062
BGA7	0,00004	0,00016	0,00029	0,00009	0,00026	0,00005	0,00075	0,00135	0,00137	0,00082	0,00110	0,00434	0,00252	0,00124	0,00056
BGA8	0,00008	0,00030	0,00053	0,00016	0,00047	0,00010	0,00009	0,00244	0,00248	0,00149	0,00199	0,00785	0,00456	0,00224	0,00101
BGA9	0,00008	0,00030	0,00054	0,00016	0,00048	0,00010	0,00009	0,00017	0,00251	0,00151	0,00201	0,00796	0,00462	0,00227	0,00103
BGA10	0,00005	0,00018	0,00032	0,00010	0,00029	0,00006	0,00005	0,00010	0,00010	0,00091	0,00121	0,00478	0,00277	0,00136	0,00062
BGA11	0,00006	0,00024	0,00043	0,00013	0,00038	0,00008	0,00007	0,00013	0,00013	0,00008	0,00161	0,00638	0,00370	0,00182	0,00082
BGA12	0,00024	0,00095	0,00170	0,00052	0,00151	0,00032	0,00029	0,00052	0,00053	0,00032	0,00043	0,02522	0,01463	0,00719	0,00326
BGA13	0,00014	0,00055	0,00098	0,00030	0,00088	0,00019	0,00017	0,00030	0,00031	0,00019	0,00025	0,00098	0,00849	0,00417	0,00189
BGA14	0,00007	0,00027	0,00048	0,00015	0,00043	0,00009	0,00008	0,00015	0,00015	0,00009	0,00012	0,00048	0,00028	0,00205	0,00093
BGA15	0,00003	0,00012	0,00022	0,00007	0,00019	0,00004	0,00004	0,00007	0,00007	0,00004	0,00006	0,00022	0,00013	0,00006	0,00042

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Gewichtung der strukturierten Matrix F erfolgt über die „Schrumpfkongstante“ δ . Die optimale „Schrumpfkongstante“ δ ist abhängig von der Größe der Teilstichprobe T bzw. von der Anzahl an paarweisen Beobachtungen. Tabelle 34 zeigt die Werte für $\frac{\hat{\kappa}}{T}$ und die daraus resultierenden Werte für δ . Weil es sich bei dem beschriebenen Schätzer um eine gewichtete Summe handelt, kann δ keine Werte annehmen, die kleiner als null oder größer als eins sind. In den Fällen T=1, T=2, T=3 und T=4 nimmt δ den maximalen Wert eins an, da der Wert für $\frac{\hat{\kappa}}{T}$ größer ist als eins. In diesen Fällen wird ausschließlich der strukturierte Schätzer genutzt.

Tabelle 34: Schrumpfkongstante δ in Abhängigkeit der Teilstichprobengröße

	T=1	T=2	T=3	T=4	T=5	T=6	T=7	T=8	T=9	T=10	T=11	T=12	T=13	T=14	T=15
$\hat{\kappa}/T$	4,1493	2,0747	1,3831	1,0373	0,8299	0,6916	0,5928	0,5187	0,4610	0,4149	0,3772	0,3458	0,3192	0,2964	0,2766
δ	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,8299	0,6916	0,5928	0,5187	0,4610	0,4149	0,3772	0,3458	0,3192	0,2964	0,2766

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 35 zeigt einen Ausschnitt der Kovarianzmatrix nach Anwendung der Shrinkage Estimation. Die Werte auf der Diagonalen entsprechen weiterhin den Varianzen. Oberhalb der Diagonalen enthält die Tabelle die Werte für δ , während unterhalb der Diagonalen die geschrumpften Kovarianzen angegeben sind.

Tabelle 35: Kovarianzmatrix nach Anwendung der Shrinkage Estimation der Biogasanlagen BGA 1 bis BGA15

	BGA1	BGA2	BGA3	BGA4	BGA5	BGA6	BGA7	BGA8	BGA9	BGA10	BGA11	BGA12	BGA13	BGA14	BGA15
BGA1	0,00052	0,29638	0,46103	0,59276	0,31918	0,69155	0,41493	0,46103	0,31918	0,51866	0,29638	0,46103	0,41493	0,31918	0,41493
BGA2	0,00063	0,00805	0,46103	0,59276	0,31918	0,69155	0,41493	0,46103	0,31918	0,51866	0,29638	0,46103	0,41493	0,31918	0,41493
BGA3	-0,00002	0,00299	0,02550	0,69155	0,46103	0,69155	0,46103	0,51866	0,46103	1,00000	0,46103	1,00000	0,51866	0,51866	0,46103
BGA4	0,00032	0,00076	0,00038	0,00240	0,59276	1,00000	0,59276	0,69155	0,59276	1,00000	0,59276	1,00000	0,59276	0,59276	0,59276
BGA5	-0,00024	0,00302	0,01324	-0,00023	0,02022	0,69155	0,41493	0,46103	0,31918	0,59276	0,31918	0,51866	0,41493	0,34578	0,41493
BGA6	0,00003	0,00001	0,00089	0,00010	0,00065	0,00091	0,69155	0,69155	0,69155	1,00000	0,69155	1,00000	0,82986	0,82986	0,69155
BGA7	0,00002	0,00049	0,00110	0,00034	0,00059	0,00001	0,00075	0,46103	0,41493	1,00000	0,41493	0,82986	0,46103	0,46103	0,41493
BGA8	0,00021	0,00110	0,00077	0,00036	0,00036	-0,00007	0,00016	0,00244	0,46103	1,00000	0,46103	0,82986	0,51866	0,51866	0,46103
BGA9	0,00024	-0,00006	-0,00003	0,00036	-0,00063	0,00010	-0,00010	0,00017	0,00251	0,59276	0,31918	0,51866	0,41493	0,34578	0,41493
BGA10	0,00008	0,00138	0,00032		0,00149	0,00006	0,00005	0,00010	-0,00019	0,00091	0,51866	0,59276	1,00000	0,59276	1,00000
BGA11	0,00017	-0,00010	-0,00206	0,00055	-0,00230	0,00013	-0,00014	0,00045	0,00036	-0,00018	0,00161	0,46103	0,41493	0,31918	0,41493
BGA12	-0,00050	-0,00086	0,00170	0,00052	0,00333	0,00032	0,00002	-0,00013	0,00088	0,00057	0,00034	0,02522	0,82986	0,51866	0,82986
BGA13	-0,00071	-0,00052	0,00045	-0,00177	0,00092	0,00019	-0,00041	-0,00073	-0,00112	0,00019	-0,00070	0,00098	0,00849	0,41493	0,46103
BGA14	-0,00044	-0,00038	0,00004	-0,00045	0,00081	0,00009	-0,00002	-0,00014	-0,00067	0,00005	-0,00045	0,00007	0,00182	0,00205	0,46103
BGA15	0,00007	0,00051	0,00077	0,00029	0,00074	-0,00003	0,00014	0,00038	-0,00008	0,00004	0,00003	0,00031	-0,00052	-0,00004	0,00042

Quelle: Eigene Berechnungen

Die „geschrumpften“ Kovarianzwerte lassen sich anhand ihrer deskriptiven Statistik beschreiben (siehe Tabelle 36). Der Mittelwert der geschrumpften Kovarianzen liegt bei 0,00033. Die Standardabweichung hat sich im Vergleich zur ursprünglichen Stichprobe verringert. Die Kovarianzwerte streuen weniger stark um den Mittelwert. Ebenfalls haben sich Minimum und Maximum in Richtung Mittelwert bewegt.

Tabelle 36: Deskriptive Statistik der "geschrumpften" Kovarianzen im Vergleich zu den Stichprobenkovarianzen

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Stichprobenkovarianzen	0,00025	0,00255	-0,06950	-0,00048	0,00010	0,00087	0,03212	15.888
"Geschrumpfte" Kovarianzen	0,00033	0,00137	-0,01762	-0,00009	0,00014	0,00054	0,02182	15.888

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Häufigkeitsverteilung der „geschrumpften“ Kovarianzen im Vergleich zur ursprünglichen Schätzung sind im Histogramm in Abbildung 47 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Häufigkeit von Kovarianzwerten nahe dem Mittelwert zunehmen, während Extremwerte reduziert werden.

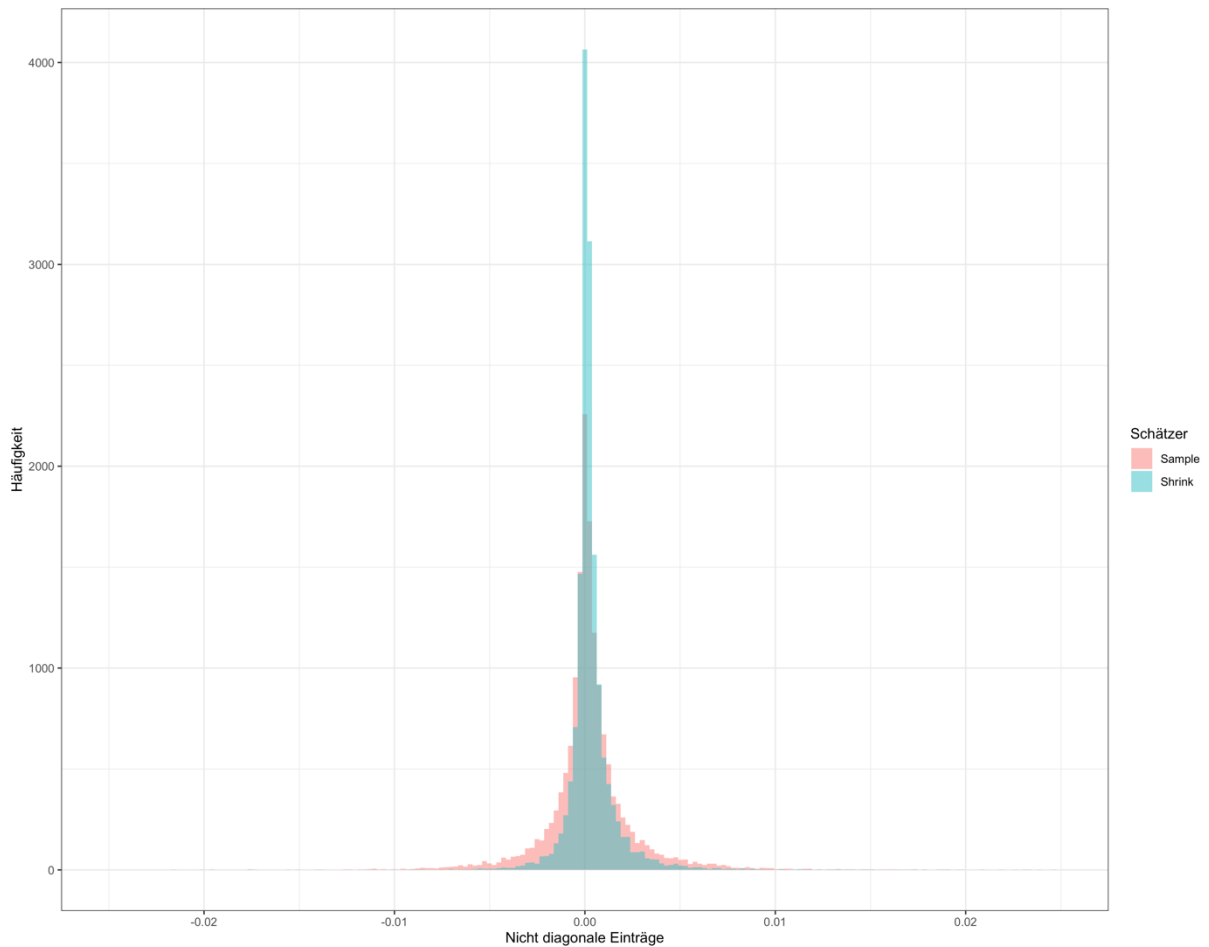


Abbildung 47: Häufigkeitsverteilung der geschrunpften Kovarianzen im Vergleich zur ursprünglichen Schätzung

Quelle: Eigene Darstellung

Auf Basis der „geschrunpften“ Kovarianzen lassen sich Korrelationskoeffizienten berechnen, die in Tabelle 37 nach ihrer Höhe kategorisiert sind. Im Vergleich zur ursprünglich geschätzten Korrelation der Stichprobe (siehe Tabelle 32) ist zu erkennen, dass die Teilstichprobengröße das Vorkommen von Extremwerten weniger stark beeinflusst. Durch die Shrinkage Estimation wurden die Schätzfehler reduziert.

Tabelle 37: Anzahl und prozentualer Anteil der „geschrunpften“ Korrelationen je Kategorie bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

	stark negativ (-1,0 ≤ p < -0,6)	negativ (-0,6 ≤ p < -0,2)	unkorreliert (-0,2 ≤ p < 0,2)	positiv (0,2 ≤ p < 0,6)	stark positiv (0,6 ≤ p ≤ 1,0)	N
≥ 2 paarw. Beobachtung	1 [0,01%]	1.229 [7,74%]	11.111 [69,93%]	3.507 [22,07%]	40 [0,25%]	15.888
≥ 5 paarw. Beobachtung	1 [0,01%]	1.227 [9,00%]	8.908 [65,33%]	3.459 [25,37%]	40 [0,29%]	13.635
≥ 10 paarw. Beobachtung	1 [0,03%]	355 [9,96%]	1.938 [54,39%]	1.233 [34,61%]	36 [1,01%]	3.563

Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 48 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Korrelationskoeffizienten der Stichprobe vor und nach der Shrinkage Estimation. Zu erkennen ist, dass die Höhe der Korrelations-

koeffizienten nach der Shrinkage Estimation weniger breit streuen. Unabhängig von der Anzahl paarweiser Beobachtungen liegt ein Großteil der Verteilung zwischen -0,5 und 0,5.

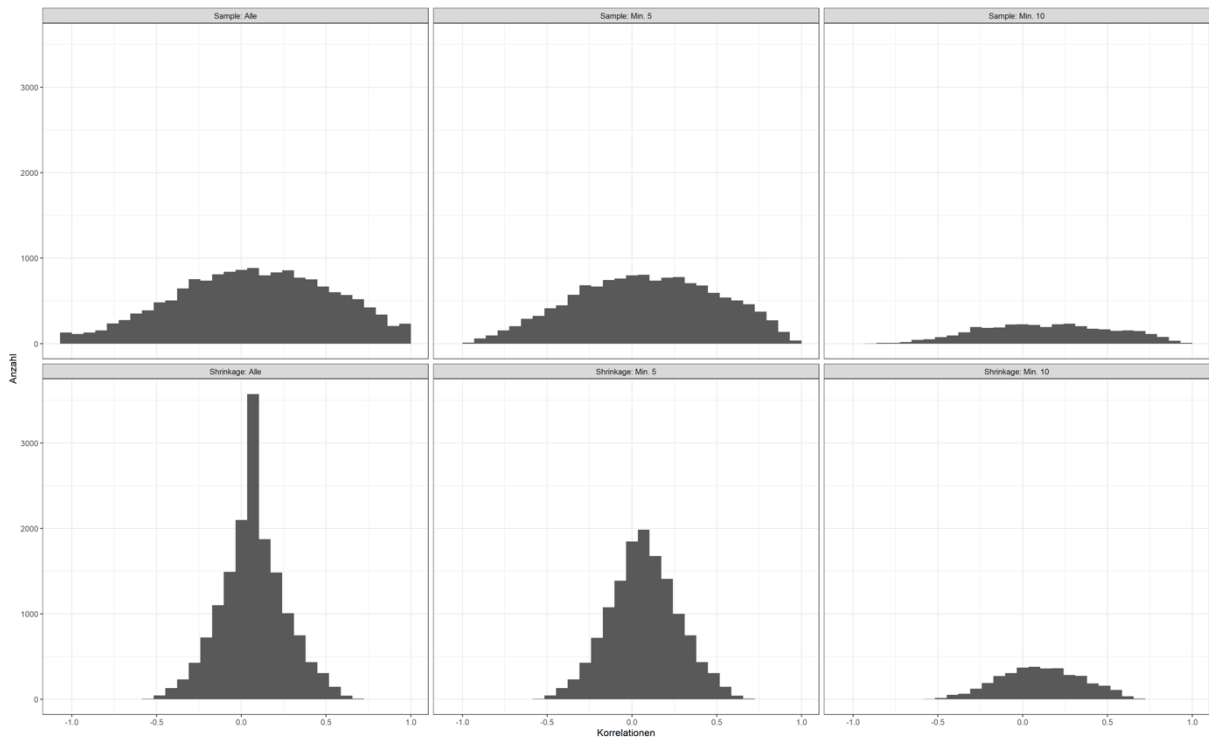


Abbildung 48: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen der Korrelationskoeffizienten vor (sample) und nach (shrinkage) der Shrinkage Estimation bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

Quelle: Eigene Darstellung

Auch nach der Shrinkage Estimation ist die Kovarianzmatrix weiterhin unvollständig. Sie weist 222 fehlende Werte auf, da die Anzahl an paarweisen Beobachtungen in diesen Fällen null oder eins beträgt. Für eine unvollständige Matrix können die Eigenwerte nicht ermittelt und dadurch auch die Definitheit nicht bestimmt werden. Um die Definitheit bestimmen zu können, werden fehlende Werte imputiert.

4.1.3.3 Ergebnisse der Imputation bei fehlenden Kovarianzwerten

In den vorstehenden Abschnitten wurde beschrieben, dass in 222 Fällen keine Kovarianz geschätzt werden kann, da für die jeweiligen Biogas-Gesellschaften keine oder nur eine paarweise Renditebeobachtung vorliegt. Die fehlenden Werte in der Kovarianzmatrix werden unter Anwendung der Methode „k-Nearest Neighbor“ imputiert. Tabelle 38 zeigt einen Ausschnitt (BGA1 bis BGA15, gesamte Matrix siehe Anhang 7 auf CD-ROM/USB-Stick) der Kovarianzmatrix der Biogas-Gesellschaften. Auf der Diagonalen sind die Varianzen dargestellt. Oberhalb der Diagonalen ist die Anzahl paarweiser Beobachtungen angegeben, auf denen die Schätzung basiert und unterhalb der Diagonalen die „geschrumpften“ Kovarianzen. BGA4 und BGA10 weisen nur eine paarweise Beobachtung auf, sodass keine Kovarianz berechnet

werden konnte. Der fehlende Wert wird durch den mit der Methode k-Nearest Neighbor ermittelten Wert 0,00007 imputiert.

Tabelle 38: Anzahl paarweiser Beobachtungen und Kovarianzen nach Imputation fehlender Werte der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15

	BGA1	BGA2	BGA3	BGA4	BGA5	BGA6	BGA7	BGA8	BGA9	BGA10	BGA11	BGA12	BGA13	BGA14	BGA15
BGA1	0,00052	14	9	7	13	6	10	9	13	8	14	9	10	13	10
BGA2	0,00063	0,00805	9	7	13	6	10	9	13	8	14	9	10	13	10
BGA3	-0,00002	0,00299	0,02550	6	9	6	9	8	9	3	9	4	8	8	9
BGA4	0,00032	0,00076	0,00038	0,00240	7	3	7	6	7	1	7	3	7	7	7
BGA5	-0,00024	0,00302	0,01324	-0,00023	0,02022	6	10	9	13	7	13	8	10	12	10
BGA6	0,00003	0,00001	0,00089	0,00010	0,00065	0,00091	6	6	6	3	6	4	5	5	6
BGA7	0,00002	0,00049	0,00110	0,00034	0,00059	0,00001	0,00075	9	10	4	10	5	9	9	10
BGA8	0,00021	0,00110	0,00077	0,00036	0,00036	-0,00007	0,00016	0,00244	9	4	9	5	8	8	9
BGA9	0,00024	-0,00006	-0,00003	0,00036	-0,00063	0,00010	-0,00010	0,00017	0,00251	7	13	8	10	12	10
BGA10	0,00008	0,00138	0,00034	0,00007	0,00149	0,00006	0,00005	0,00010	-0,00019	0,00091	8	7	4	7	4
BGA11	0,00017	-0,00010	-0,00206	0,00055	-0,00230	0,00013	-0,00014	0,00045	0,00036	-0,00018	0,00161	9	10	13	10
BGA12	-0,00050	-0,00086	0,00170	0,00052	0,00333	0,00032	0,00002	-0,00013	0,00088	0,00057	0,00034	0,02522	5	8	5
BGA13	-0,00071	-0,00052	0,00045	-0,00177	0,00092	0,00019	-0,00041	-0,00073	-0,00112	0,00019	-0,00070	0,00098	0,00849	10	9
BGA14	-0,00044	-0,00038	0,00004	-0,00045	0,00081	0,00009	-0,00002	-0,00014	-0,00067	0,00005	-0,00045	0,00007	0,00182	0,00205	9
BGA15	0,00007	0,00051	0,00077	0,00029	0,00074	-0,00003	0,00014	0,00038	-0,00008	0,00004	0,00003	0,00031	-0,00052	-0,00004	0,00042

Quelle: Eigene Berechnungen

Die deskriptive Statistik in Tabelle 39 zeigt, dass alle imputierten Kovarianzwerte zwischen dem Minimum von -0,00130 und dem Maximum von 0,00172 liegen. Der Mittelwert der imputierten Kovarianzwerte liegt mit 0,00022 unter dem Mittelwert der „geschrumpften“ Kovarianzen. Im Vergleich zu den ursprünglichen Stichprobenvarianzen ist zu erkennen, dass die Anwendung der Methode „k-Nearest Neighbor“ nicht zu Extremwerten geführt hat. Die deskriptive Statistik der geschrumpften 15.888 Kovarianzwerte unterscheidet sich nur minimal von der deskriptiven Statistik der 16.110 „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzwerte.

Tabelle 39: Deskriptive Statistik der „geschrumpften“ Kovarianzen vor und nach der Imputation sowie der imputierten Werte

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
"Geschrumpfte" Kovarianzen	0,00033	0,00137	-0,01762	-0,00009	0,00014	0,00054	0,02182	15.888
Imputierte Werte	0,00022	0,00034	-0,00130	-0,00004	0,00018	0,00036	0,00172	222
"Geschrumpfte" Kovarianzen mit imputierten Werten	0,00032	0,00136	-0,01762	-0,00009	0,00014	0,00053	0,02182	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Das Histogramm in Abbildung 49 zeigt die Häufigkeitsverteilung der geschrumpften Kovarianzwerte in grün, die durch die imputierten Werte (rot) ergänzt wird. Ein Großteil der imputierten Werte liegt nahe Null, was der Häufigkeitsverteilung der ursprünglichen Stichprobenkovarianzen entspricht. Auch das Histogramm zeigt, dass durch die Imputation der fehlenden Kovarianzwerte keine Extremwerte generiert werden.

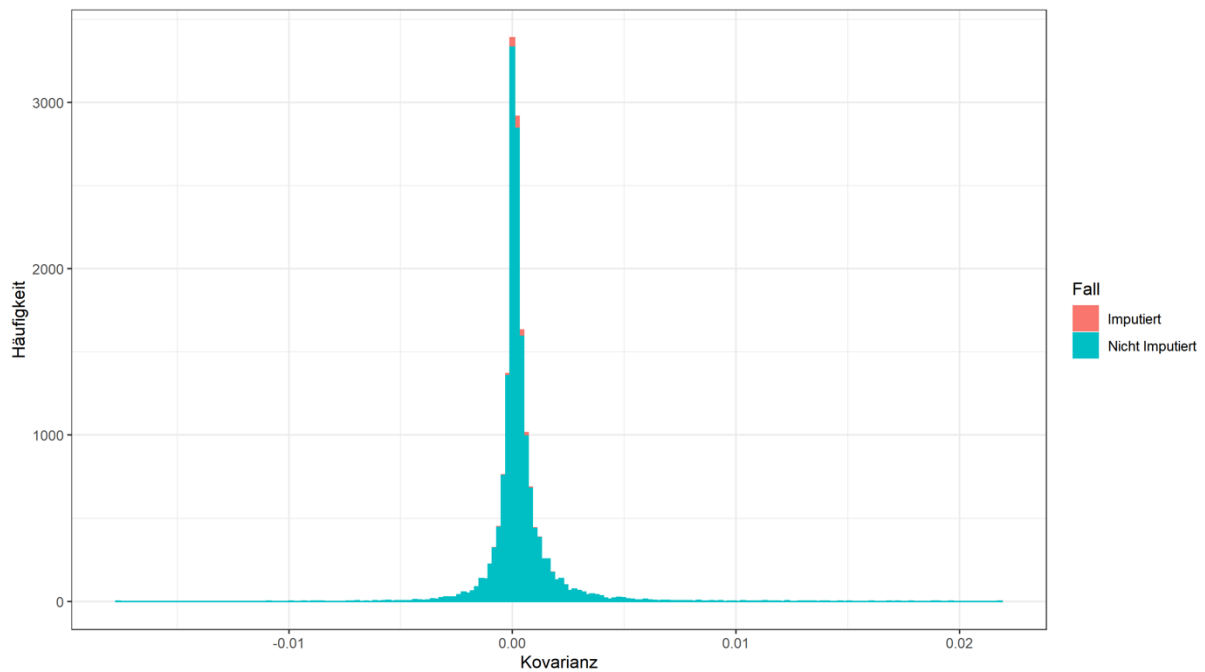


Abbildung 49: Häufigkeitsverteilung der „geschrumpften“ Kovarianzen vor und nach der Imputation fehlender Werte

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 40 zeigt die Anzahl und den prozentualen Anteil der „geschrumpften“ Korrelationen nach der Imputation fehlender Werte je Kategorie bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen. Die erste Zeile (< 2 paarw. Beobachtung) beinhaltet die imputierten Werte. Ein Großteil der imputierten Werte befindet sich in der Kategorie „unkorreliert“, wobei keine „stark negativen“ Korrelationen, jedoch zwölf „stark positive“ Korrelationen imputiert wurden. In der letzten Zeile sind die Werte der ersten und zweiten Zeile summiert, sodass diese die Korrelationskoeffizienten der vollständigen Matrix enthält.

Tabelle 40: Anzahl und prozentualer Anteil der „geschrumpften“ Korrelationen nach der Imputation fehlender Werte je Kategorie bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

	stark negativ (-1,0 ≤ p < -0,6)	negativ (-0,6 ≤ p < -0,2)	unkorreliert (-0,2 ≤ p < 0,2)	positiv (0,2 ≤ p < 0,6)	stark positiv (0,6 ≤ p ≤ 1,0)	N
< 2 paarw. Beobachtung	0 [0,00%]	6 [2,70%]	141 [63,51%]	63 [28,38%]	12 [5,41%]	222
≥ 2 paarw. Beobachtung	1 [0,01%]	1.229 [7,74%]	11.111 [69,93%]	3.507 [22,07%]	40 [0,25%]	15.888
≥ 5 paarw. Beobachtung	1 [0,01%]	1.227 [9,00%]	8.908 [65,33%]	3.459 [25,37%]	40 [0,29%]	13.635
≥ 10 paarw. Beobachtung	1 [0,03%]	355 [9,96%]	1.938 [54,39%]	1.233 [34,61%]	36 [1,01%]	3.563
alle	1 [0,01%]	1.235 [7,67%]	11.252 [69,84%]	3.570 [22,16%]	52 [0,32%]	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Nachdem durch die Imputation der fehlenden Kovarianzwerte eine vollständige Matrix vorliegt, kann die Definitheit dieser bestimmt werden. Durch die Singulärwertzerlegung wurden 15 negative Eigenwerte ermittelt. Die Matrix ist demnach nicht positiv semidefinit, sondern indefinit. Für die Portfolioanalyse ist eine positiv semidefinite Kovarianzmatrix eine wichtige

Voraussetzung. Im nächsten Schritt wird die positiv semidefinite Matrix ermittelt, die die Frobenius Norm zur „geschrumpften“ Kovarianzmatrix mit imputierten Werten minimiert.

4.1.3.4 Nearest positive semidefinite Matrix (Kovarianz und Korrelation)

Die „geschrumpfte“ und imputierte Kovarianzmatrix ist mit 15 negativen Eigenwerten nicht positiv semidefinit. Für die Portfolioanalyse ist eine positiv semidefinite Kovarianzmatrix jedoch eine wichtige Voraussetzung. Der von Higham (2002) entwickelte Algorithmus wird genutzt, um auf Basis der „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzmatrix eine positiv semidefinite Matrix zu schätzen, die die Frobenius Norm minimiert.

Tabelle 41 zeigt oberhalb der Diagonalen einen Ausschnitt (BGA1 bis BGA15, gesamte Matrix siehe Anhang 8 auf CD-ROM/USB-Stick) der „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzmatrix. Auf der Diagonalen sind die Varianzen dargestellt. Unterhalb der Diagonalen ist die Matrix dargestellt, die die Frobenius Norm zur „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzmatrix minimiert. Der Abstand zwischen den beiden Matrizen beträgt als Frobenius Norm 0,006535572. Zum Vergleich: Die Frobenius Norm der ursprünglichen „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzmatrix beträgt 0,6235741.

Tabelle 41: „Geschrumpfte“ und imputierte Kovarianzmatrix im Vergleich zur „nächsten“ positiv semidefiniten Kovarianzmatrix der Biogasanlagen BGA1 bis BGA15

	BGA1	BGA2	BGA3	BGA4	BGA5	BGA6	BGA7	BGA8	BGA9	BGA10	BGA11	BGA12	BGA13	BGA14	BGA15
BGA1	0,00057	0,00063	-0,00002	0,00032	-0,00024	0,00003	0,00002	0,00021	0,00024	0,00008	0,00017	-0,00050	-0,00071	-0,00044	0,00007
BGA2	0,00064	0,00822	0,00299	0,00076	0,00302	0,00001	0,00049	0,00110	-0,00006	0,00138	-0,00010	-0,00086	-0,00052	-0,00038	0,00051
BGA3	-0,00002	0,00288	0,02565	0,00038	0,01324	0,00089	0,00110	0,00077	-0,00003	0,00032	-0,00206	0,00170	0,00045	0,00004	0,00077
BGA4	0,00029	0,00069	0,00034	0,00261	-0,00023	0,00010	0,00034	0,00036	0,00036	0,00007	0,00055	0,00052	-0,00177	-0,00045	0,00029
BGA5	-0,00025	0,00314	0,01311	-0,00020	0,02036	0,00065	0,00059	0,00036	-0,00063	0,00149	-0,00230	0,00333	0,00092	0,00081	0,00074
BGA6	0,00003	0,00003	0,00092	0,00005	0,00063	0,00100	0,00001	-0,00007	0,00010	0,00006	0,00013	0,00032	0,00019	0,00009	-0,00003
BGA7	0,00002	0,00046	0,00114	0,00035	0,00056	0,00001	0,00079	0,00016	-0,00010	0,00005	-0,00014	0,00002	-0,00041	-0,00002	0,00014
BGA8	0,00018	0,00106	0,00080	0,00039	0,00034	-0,00007	0,00019	0,00249	0,00017	0,00010	0,00045	-0,00013	-0,00073	-0,00014	0,00038
BGA9	0,00027	-0,00007	0,00000	0,00030	-0,00066	0,00011	-0,00009	0,00017	0,00256	-0,00019	0,00036	0,00088	-0,00112	-0,00067	-0,00008
BGA10	0,00007	0,00127	0,00040	0,00009	0,00140	0,00002	0,00009	0,00013	-0,00017	0,00102	-0,00018	0,00057	0,00019	0,00005	0,00004
BGA11	0,00020	-0,00020	-0,00198	0,00052	-0,00240	0,00014	-0,00014	0,00044	0,00039	-0,00010	0,00174	0,00034	-0,00070	-0,00045	0,00003
BGA12	-0,00049	-0,00086	0,00170	0,00051	0,00332	0,00030	0,00000	-0,00015	0,00087	0,00058	0,00035	0,02526	0,00098	0,00007	0,00031
BGA13	-0,00071	-0,00048	0,00041	-0,00176	0,00095	0,00020	-0,00042	-0,00073	-0,00113	0,00016	-0,00073	0,00097	0,00851	0,00182	-0,00052
BGA14	-0,00047	-0,00033	0,00000	-0,00045	0,00086	0,00009	-0,00003	-0,00013	-0,00069	0,00001	-0,00051	0,00007	0,00183	0,00211	-0,00004
BGA15	0,00006	0,00047	0,00080	0,00030	0,00071	-0,00004	0,00017	0,00040	-0,00007	0,00008	0,00004	0,00031	-0,00053	-0,00005	0,00045

Quelle: Eigene Berechnungen

Auch die deskriptive Statistik der „nearest positive semidefinite matrix“ zeigt nur eine geringe Veränderung zur „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzmatrix. Der Mittelwert der Kovarianzen hat sich mit 0,00032 nicht verändert. Die Standardabweichung der Kovarianzwerte ist von 0,00136 auf 0,00135 zurück gegangen. Der Median beträgt vor der Anpassung 0,00014 und nach der Anpassung 0,00013. Der minimale Wert von -0,01762 hat sich nicht verändert, während der Maximalwert von 0,02182 auf 0,02181 gesunken ist.

Tabelle 42: Deskriptive Statistik der „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzen im Vergleich zur „nächsten“ positiv semidefiniten Kovarianzmatrix

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
"Geschrumpfte"								
Kovarianzen mit imputierten Werten	0,00032	0,00136	-0,01762	-0,00009	0,00014	0,00053	0,02182	16.110
Nearest positive semidefinite matrix	0,00032	0,00135	-0,01762	-0,00008	0,00013	0,00053	0,02181	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Das Histogramm in Abbildung 50 zeigt im Hintergrund die Häufigkeitsverteilung der „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzwerte (rot) und im Vordergrund die Kovarianzwerte der positiv semidefiniten Matrix, die die Frobenius Norm minimiert (blau). Zu erkennen ist, dass die Werte um den Mittelwert zugenommen haben und die Werte weiter außen abgenommen haben.

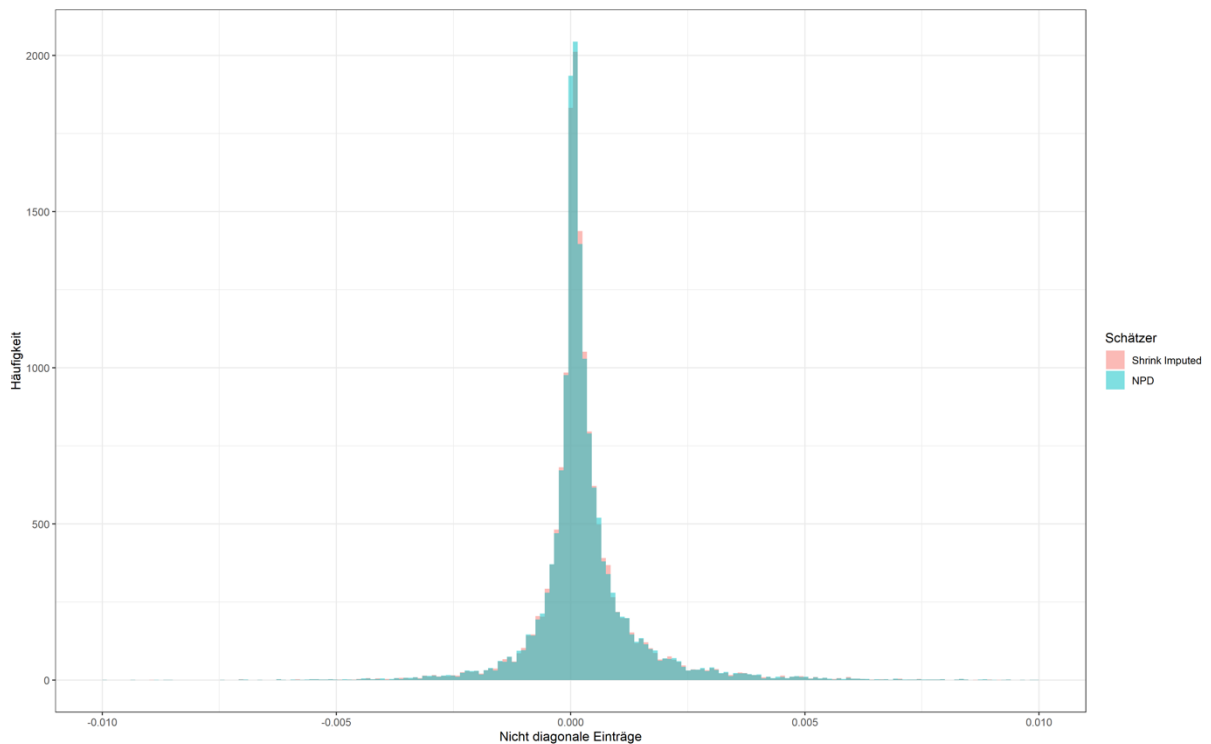


Abbildung 50: Häufigkeitsverteilung der „geschrumpften“ und imputierten Kovarianzwerte im Vergleich zu den Kovarianzwerten der positiv semidefiniten Matrix, die die Frobenius Norm minimiert
Quelle: Eigene Darstellung

Besser interpretieren lassen sich Korrelationen, da diese im Vergleich zu Kovarianzen standardisiert sind. Bevor die „nearest positive semidefinite matrix“ als Kovarianzmatrix als Parameter in die Portfolioanalyse eingeht, werden zur besseren Interpretierbarkeit Korrelationskoeffizienten geschätzt und kategorisiert (siehe Tabelle 43).

Tabelle 43: Anzahl und prozentualer Anteil der Korrelationskoeffizienten der positiv semidefiniten Matrix, die die Frobenius Norm minimiert bei unterschiedlicher Mindestanzahl paarweiser Beobachtungen

	stark negativ ($-1,0 \leq p < -0,6$)		negativ ($-0,6 \leq p < -0,2$)		unkorreliert ($-0,2 \leq p < 0,2$)		positiv ($0,2 \leq p < 0,6$)		stark positiv ($0,6 \leq p \leq 1,0$)		N
alle	2	[0,01%]	1.210	[7,51%]	11.293	[70,10%]	3.558	[22,09%]	47	[0,29%]	16.110
≥5 paarw. Beobachtung	2	[0,01%]	1.205	[8,84%]	8.921	[65,43%]	3.461	[25,38%]	46	[0,34%]	13.635
≥10 paarw. Beobachtung	2	[0,06%]	366	[10,27%]	1.905	[53,47%]	1.248	[35,03%]	42	[1,18%]	3.563

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Korrelationen der Stichprobe weisen sowohl positive als auch negative Extremwerte auf. Der Anteil stark negativer und stark positiver Korrelationen beträgt 8,35% bzw. 13,67%. Durch die Shrinkage Estimation sinkt der Anteil stark negativer und stark positiver Korrelationen auf unter 0,3%. Der Anteil von Biogasanlagen in der Kategorie „unkorreliert“ steigt von rund 30% auf rund 70%. Die Imputation fehlender Werte sowie die notwendigen Anpassungen, um eine positiv semidefinite Kovarianzmatrix zu erhalten, verändern die Anteile in den verschiedenen Kategorien kaum.

4.2 Analyse des Portfolioeffekts

4.2.1 Portfolioeffekt bei Markowitz-Diversifikation

4.2.1.1 Effiziente Portfolios im Rendite-Risiko-Diagramm

4.2.1.1.1 Rendite-SD-effiziente Portfolios

Zur Darstellung der Ausgangssituation werden zunächst die einzelnen Biogasanlagen in einem Rendite-Risiko-Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 51). Der Mittelwert der Renditen und der Mittelwert der Standardabweichung ist durch die gestrichelten Linien dargestellt und unterteilt das Diagramm in vier Sektoren.

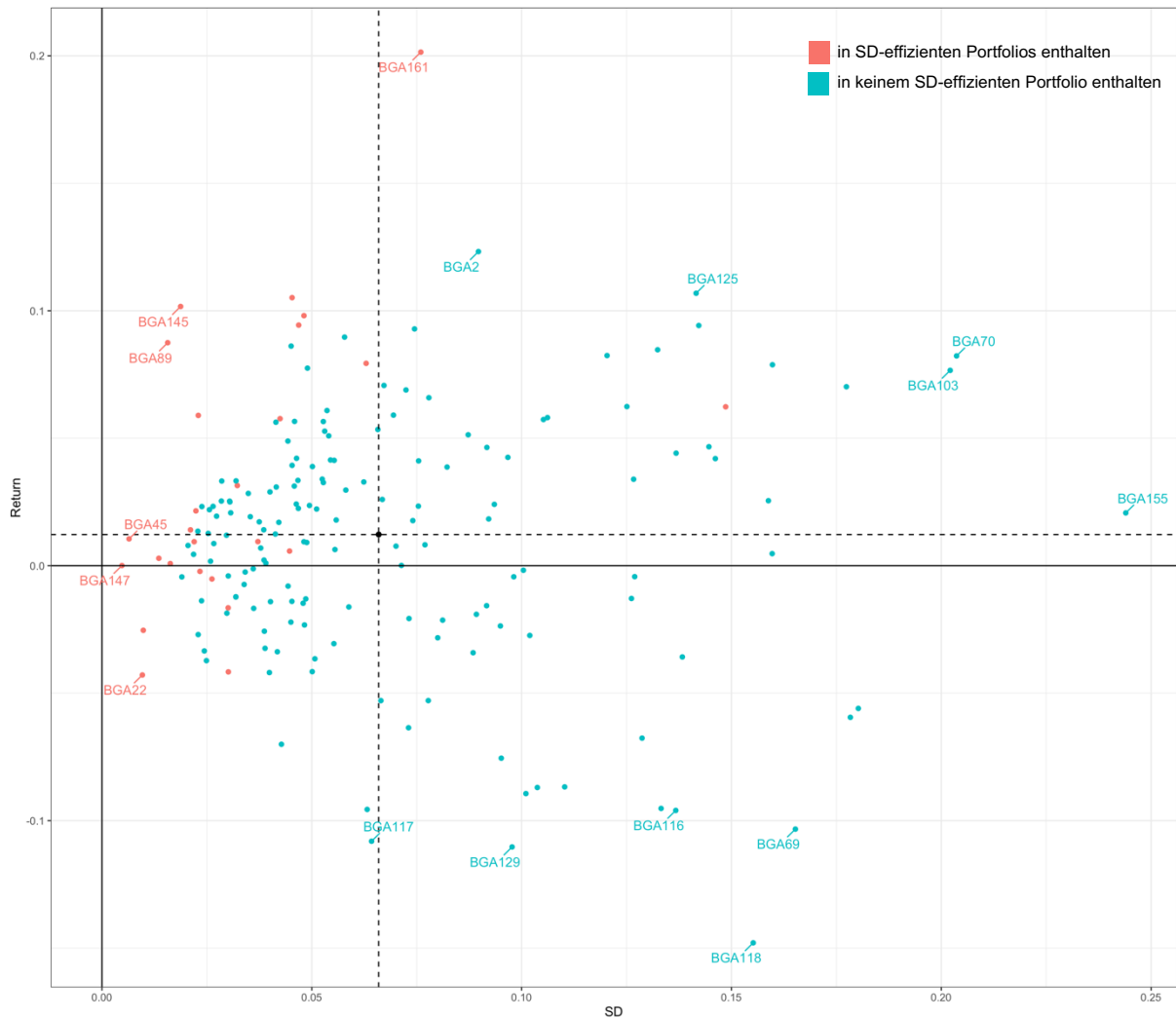


Abbildung 51: Die Biogasanlagen der Stichprobe im Rendite-SD-Diagramm

Quelle: Eigene Darstellung

Der Mittelwert der Renditen beträgt 1,22%. Zu erkennen ist, dass 93 Biogas-Gesellschaften eine überdurchschnittliche Rendite erwarten lassen, während bei 87 Biogas-Gesellschaften eine unterdurchschnittliche Rendite zu erkennen ist. BGA161 erzielt mit 20,14% die höchste Rendite. Die zweithöchste Rendite in Höhe von 12,32% hat BGA2 erzielt. Auf Rang drei folgt BGA125 mit einer Rendite von 10,69%. BGA118, BGA129 und BGA117 weisen mit -14,79%, -11,03% und -10,81% die geringsten Renditen auf.

Der Mittelwert der Standardabweichungen beträgt 6,58%. Von den 93 Biogas-Gesellschaften mit einer überdurchschnittlichen Rendite weisen 58 ein unterdurchschnittliches Risiko auf, während 35 mit einem überdurchschnittlichen Risiko verbunden sind. Von den 87 unterdurchschnittlich rentablen Biogas-Gesellschaften sind 55 mit einem unterdurchschnittlichen Risiko und 32 mit einem überdurchschnittlichen Risiko verbunden. Insgesamt sind 113 Biogas-Gesellschaften mit einem unterdurchschnittlichen Risiko verbunden, während bei 67 Biogas-Gesellschaften das Risiko über dem Durchschnitt liegt. Wobei die Biogasanlagen BGA147,

BGA45 und BGA22 die geringste Standardabweichung erzielt haben, während die Renditen der Biogasanlagen BGA155, BGA70 und BGA103 der größten Streuung unterliegen.

Mit der höchsten Sharpe Ratio bzw. der höchsten risikoadjustierten Rendite sind die Biogasanlagen BGA89 (5,59), BGA145 (5,43) und BGA161 (2,65) verbunden. Die drei rangletzten Biogasanlagen in Bezug auf die Sharpe Ratio sind BGA118, BGA69 und BGA116. Da diese drei Biogasanlagen mit einer negativen Rendite verbunden sind wurde die Rangfolge mit der adjustierten Sharpe Ratio ermittelt. Da die Höhe der adjustierten Sharpe Ratio nicht interpretierbar ist, wird auf die Zahlenangabe verzichtet.

In Rot sind jene Biogasanlagen dargestellt, die mit einem Anteil von mindestens 1% in einem Portfolio auf der Effizienzlinie (oberhalb des MVP) enthalten sind. Die in Blau dargestellten Biogasanlagen sind in keinem Portfolio auf der Effizienzlinie mit einem Anteil von mehr als 1% enthalten.

Die Lösung des in Kapitel 3.2.2.1 beschriebenen Optimierungsproblems führt zu der in Abbildung 52 dargestellten Effizienzlinie, wobei nur die Portfolios auf dem Ast oberhalb des Minimum-Varianz-Portfolios dem Effizienzkriterium entsprechen. Die Portfolios auf dem Ast unterhalb des Minimumvarianzportfolios werden durch Portfolios auf dem oberen Ast dominiert und sind nicht effizient. Der Verlauf der Kurve entspricht den von Markowitz erarbeiteten und in der einschlägigen Literatur zum Portfoliomanagement beschriebenen Erkenntnissen.

Während die auf der Y-Achse abgetragene Rendite positive und negative Werte annehmen kann, handelt es sich bei der Standardabweichung um ein symmetrisches Risikomaß, das keine negativen Werte annehmen kann. Durch den Farbverlauf der Kurve kann neben der Rendite und der Standardabweichung eine weitere Dimension berücksichtigt werden: der Conditional Value at Risk. Zu erkennen ist, dass ineffiziente Portfolios auf dem Ast unterhalb des Minimumvarianzportfolios mit einem höheren Conditional Value at Risk verbunden sind, als effiziente Portfolios. Außerdem ist zu erkennen, dass der Conditional Value at Risk für höhere Renditen im Gegensatz zur Standardabweichung nicht steigt.

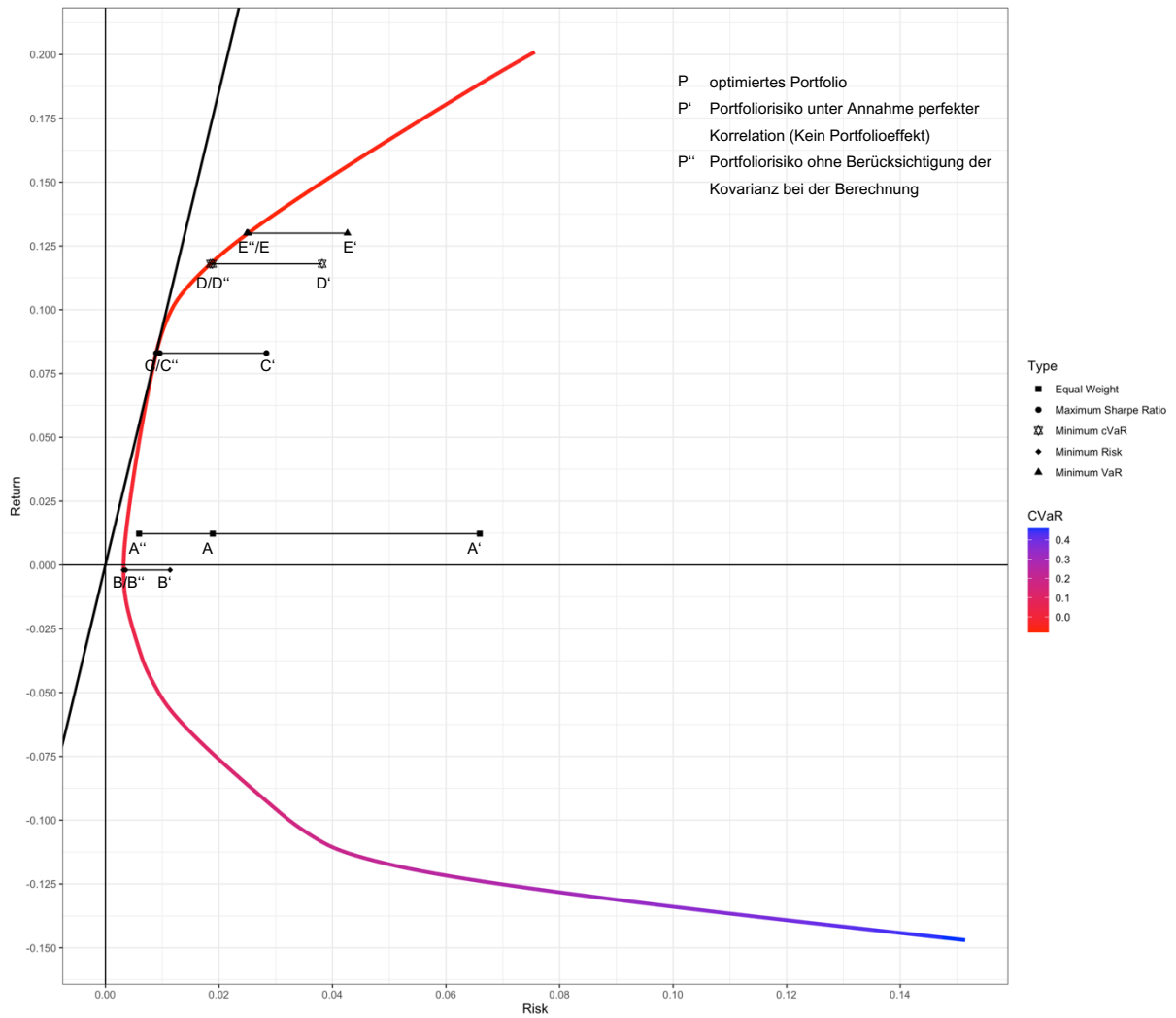


Abbildung 52: Kurve der Rendite-SD-effizienten Portfolios
 Quelle: Eigene Darstellung

Um das Diversifikationspotenzial bei Investitionen in Biogasanlagen quantifizieren zu können, werden, wie in Tabelle 44 dargestellt, verschiedene Referenzpunkte verglichen. Die durchschnittliche Rendite und das durchschnittliche Risiko einer Einzelinvestition ist in Punkt A' dargestellt. Der Mittelwert der Rendite liegt bei einer Einzelinvestition bei 1,22% und die Standardabweichung im Mittelwert bei 6,59%.

Tabelle 44: Relative Risikoänderung ausgewählter Rendite-SD-effizienter Portfolios

Portfolio	E(x)	SD	SD'	SD''	SD-SD'	relative Risikoänderung
EWP (A)	1,22%	1,89%	6,59%	0,59%	-4,70	-71%
MVP (B)	-0,20%	0,32%	1,14%	0,36%	-0,82	-72%
MSRP (C)	8,30%	0,89%	2,84%	0,96%	-1,95	-69%
MVaRP (E)	13,00%	2,51%	4,26%	2,49%	-1,75	-41%
MCVaRP (D)	11,80%	1,85%	3,82%	1,88%	-1,97	-52%

Quelle: Eigene Berechnungen

Das Equal-Weight-Portfolio beinhaltet gleichgewichtete Anteile aller Biogasanlagen. Der Referenzpunkt A' entspricht dem Equal-Weight-Portfolio unter Annahme einer perfekt positiven Korrelation der Biogasanlagen untereinander. Punkt A dagegen zeigt das Equal-Weight-Portfolio unter Berücksichtigung des Diversifikationseffekts. Naive Diversifikation führt demnach zu einer Renditeerwartung von 1,22% und einer Standardabweichung von 1,89%. Das Equal-Weight-Portfolio liegt nicht auf der Effizienzlinie. Dennoch ist durch naive Diversifikation gegenüber der Einzelinvestition (Punkt A') eine Risikoreduktion von 4,70%-Punkten möglich.

Der Punkt A'' zeigt das Equal-Weight-Portfolio ohne Berücksichtigung der Kovarianz bei der Berechnung des Portfoliorisikos. Punkt A'' liegt links von Punkt A. Das bedeutet, dass das Risiko ohne Berücksichtigung der Kovarianz geringer ausfällt. Das Equal-Weight-Portfolio ist mit einem Risiko von 1,89% verbunden. Ohne Berücksichtigung der Kovarianz liegt das Risiko dieses Portfolios bei 0,59%. Die Kovarianz führt in diesem Fall also zu einer Risikosteigerung in Höhe von 1,30%-Punkten. Begründen lässt sich dieser Effekt damit, dass die Renditen der Biogasanlagen im Mittel positiv kovariieren. Die Kovarianzmatrix der Biogasanlagen und die Verteilung der Kovarianzen ist in Kapitel 4.1.3.4 beschrieben. Der Mittelwert der Kovarianzen beträgt 0,00032.

Vergleicht man jedoch die Investition in eine Einzelanlage oder das Equal-Weight-Portfolio mit dem effizienten Portfolio bei einem Renditeniveau von 1,22%, ist zu erkennen, dass das Risiko bei identischer Rendite weiter reduziert werden kann. Das effiziente Portfolio mit einer Rendite in Höhe von 1,22% ist mit einer Standardabweichung von nur 0,42% verbunden. Gegenüber der Investition in eine Einzelanlage ist eine Risikoreduktion von 6,16%-Punkten möglich, gegenüber dem Equal-Weight-Portfolio sind es 1,47%-Punkte.

Das varianzminimale Portfolio liegt auf der Effizienzlinie und ist in Punkt B dargestellt. Es ist mit einem Risiko von 0,32% und einer Rendite von -0,20% verbunden. Die Risikoreduktion gegenüber dem Equal-Weight-Portfolio entspricht demnach 1,57%-Punkten und gegenüber der Einzelinvestition 6,26%-Punkten. Die Rendite des Minimumvarianzportfolios liegt 1,42%-Punkte unter der Rendite des Equal-Weight Portfolios und der durchschnittlichen Rendite einer Einzelinvestition.

Um den Portfolioeffekt beim Minimumvarianzportfolio zu quantifizieren, wurde als Referenz das Minimumvarianzportfolio unter Annahme einer perfekten Korrelation der Biogasanlagen untereinander berechnet. Die Standardabweichung im Punkt B' beträgt 1,14% und liegt damit 0,82%-Punkte über der des Minimumvarianzportfolios unter Berücksichtigung des Diversifikationseffektes.

Der Punkt B'' liegt minimal rechts neben dem Minimumvarianzportfolio. Im Gegensatz zu Punkt B beschreibt Punkt B'' das Risiko des Minimumvarianzportfolios ohne Berücksichtigung des

Effekts durch die Kovarianz. Die Standardabweichung beträgt 0,36% und liegt 0,04%-Punkte über dem Portfoliorisiko unter Berücksichtigung der Kovarianz.

Das Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio ist in Punkt C dargestellt. Die Kapitalmarktklinie unterstellt einen risikolosen Zinssatz von 0,00%. Das Tangentialportfolio ist mit einer Rendite von 8,30% und einem Risiko von 0,89% verbunden. Die Sharpe Ratio liegt demnach bei 9,28. Der Referenzpunkt C' geht wiederum von einer perfekten Korrelation der Biogasanlagen im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio aus und ist mit einer Standardabweichung von 2,84% verbunden. Das Risikodiversifikationspotenzial liegt demnach bei 1,95%-Punkten.

Auch das Risiko des Portfolios mit der maximalen Sharpe Ratio wurde einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Kovarianzen berechnet. Ohne Berücksichtigung der Kovarianz (Punkt C'') liegt die Standardabweichung bei 0,96% und damit 0,07%-Punkte über der Standardabweichung unter Berücksichtigung der Kovarianz. Die negativen Kovarianzen der Biogasanlagen im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio führt demnach zu einer zusätzlichen Risikoreduzierung.

Um die Wirkung unterschiedlicher Risikomaße einordnen zu können, sind im Diagramm in Abbildung 52 das MCVaR-Portfolio und das MVaR-Portfolio in den Punkten D und E dargestellt. Beide Portfolios befinden sich im effizienten Bereich der Kurve. Das in Punkt D dargestellte MCVaR-Portfolio ist mit einer Rendite von 11,80% und einer Standardabweichung von 1,85% verbunden. Das in Punkt E dargestellte MVaR-Portfolio ist mit einer Rendite von 13,00% und einer Standardabweichung von 2,51% verbunden.

4.2.1.1.2 Rendite-VaR-effiziente Portfolios

Das Diagramm in Abbildung 53 weist ebenfalls auf der Ordinate die erwartete Rendite der Biogas-Gesellschaften aus. Auf der Abszisse ist nicht die Standardabweichung als Risikomaß dargestellt, sondern der Value at Risk bei einem Konfidenzniveau von 5%. Im Gegensatz zur Standardabweichung kann der Value at Risk negative Werte annehmen. Ein negativer Value at Risk bedeutet, dass eine Biogas-Gesellschaft auch in den schlechtesten 5% der Fälle eine positive Rendite erzielt. Der Mittelwert des Value at Risk beträgt 9,62%. Im Durchschnitt wird in 95% der Fälle ein Verlust von 9,62% nicht überschritten. Von den 93 Biogas-Gesellschaften mit einer überdurchschnittlichen Rendite weisen 68 einen unterdurchschnittlichen Value at Risk auf, während 25 Biogas-Gesellschaften mit einem überdurchschnittlichen Value at Risk verbunden sind. Von den 87 unterdurchschnittlich rentablen Biogas-Gesellschaften haben 44 einen unterdurchschnittlichen Value at Risk und 43 einen überdurchschnittlichen Value at Risk. Insgesamt liegt bei 112 Biogasanlagen der Value at Risk unter dem Durchschnitt, während bei 68 Biogasanlagen der Value at Risk über dem Durchschnitt liegt.



Abbildung 53: Die Biogasanlagen der Stichprobe im Rendite-VaR-Diagramm

Quelle: Eigene Darstellung

Die Biogasanlagen BGA161 (-7,65%), BGA145 (-7,08%) und BGA89 (-6,17%) haben den geringsten Value at Risk erzielt, während die Biogasanlagen BGA118 (40,32%), BGA155 (38,06%) und BGA69 (37,51%) mit dem höchsten Value at Risk verbunden sind.

Lediglich fünf der dargestellten 180 Biogasanlagen sind mit einem Anteil von mindestens 1% in einem Portfolio auf der Effizienzlinie (oberhalb des MVP) enthalten. Diese sind in Rot dargestellt. Die in Blau dargestellten Biogasanlagen sind in keinem Portfolio auf der Effizienzlinie mit einem Anteil von mehr als 1% enthalten.

Die Lösung des Optimierungsproblems für das Risikomaß Value at Risk führt zu der in Abbildung 54 dargestellten Effizienzkurve. Der Verlauf der Effizienzkurve beim Value at Risk unterscheidet sich in ihrer Form vom Verlauf der Effizienzkurve beim Risikomaß der Standardabweichung (siehe Abbildung 52). Während die Äste unterhalb der risikominimalen Portfolios sehr ähnlich verlaufen, unterscheiden sich die Kurven der effizienten Portfolios oberhalb des risikominimalen Portfolios stark. Der Teil der Kurve auf dem sich die effizienten Portfolios befinden, ist beim Value at Risk als Risikomaß kürzer und steiler im Vergleich zur Kurve beim

Risikomaß der Standardabweichung. Das liegt daran, dass es sich beim Value at Risk im Gegensatz zur Varianz bzw. Standardabweichung um ein einseitiges Downside-Risikomaß handelt und die Gewichtungen der Portfolios auf der Effizienzkurve trotz unterschiedlicher Risikomaße identisch sind.

Im Gegensatz zur Standardabweichung kann der Value at Risk negative Werte annehmen. Ein negativer Wert für den Value at Risk bedeutet, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% eine Rendite von null nicht unterschritten wird. Oder anders ausgedrückt: in 95% der Fälle ist trotz der Schwankungen keine negative Rendite zu erwarten. Der Ast der Effizienzkurve unterhalb des risikominimalen Portfolios verläuft im positiven und im negativen Bereich des Diagramms, während der Ast oberhalb des risikominimalen Portfolios ausschließlich im negativen Bereich verläuft. Demnach ist zu erkennen, dass alle effizienten Portfolios mit einem negativen Value at Risk verbunden sind und bei diesen Portfolios keine negative Rendite zu erwarten ist.

Die Tatsache, dass der Value at Risk im Gegensatz zur Standardabweichung negative Werte annehmen kann, führt dazu, dass die Sharpe Ratio nicht analog berechnet und interpretiert werden kann. Das ist auch der Grund, warum im Diagramm in Abbildung 54 keine Kapitalmarktlinie berücksichtigt wurde. Bei einem angenommenen Marktzins von null, hätte die Kapitalmarktlinie eine negative Steigung und das Tangentialportfolio würde sich im ineffizienten Teil der Kurve unterhalb des risikominimalen Portfolios befinden.

Durch den Farbverlauf der Kurve kann neben den beiden Dimensionen Rendite und Value at Risk eine weitere Dimension, nämlich die der Standardabweichung berücksichtigt werden. Es ist zu erkennen, dass der varianzminimale Bereich unterhalb des Portfolios mit dem niedrigsten Value at Risk liegt. Die Standardabweichung nimmt bis zum Maximum-Ertrags-Portfolio zu. Die Portfolios mit dem maximalen Value at Risk sind auch mit der größten Standardabweichung verbunden und auf dem unteren Ast angesiedelt. Auch auf dem Ast oberhalb des Portfolios mit dem minimalen Value at Risk nehmen Standardabweichung und Value at Risk mit steigender Rendite zu.

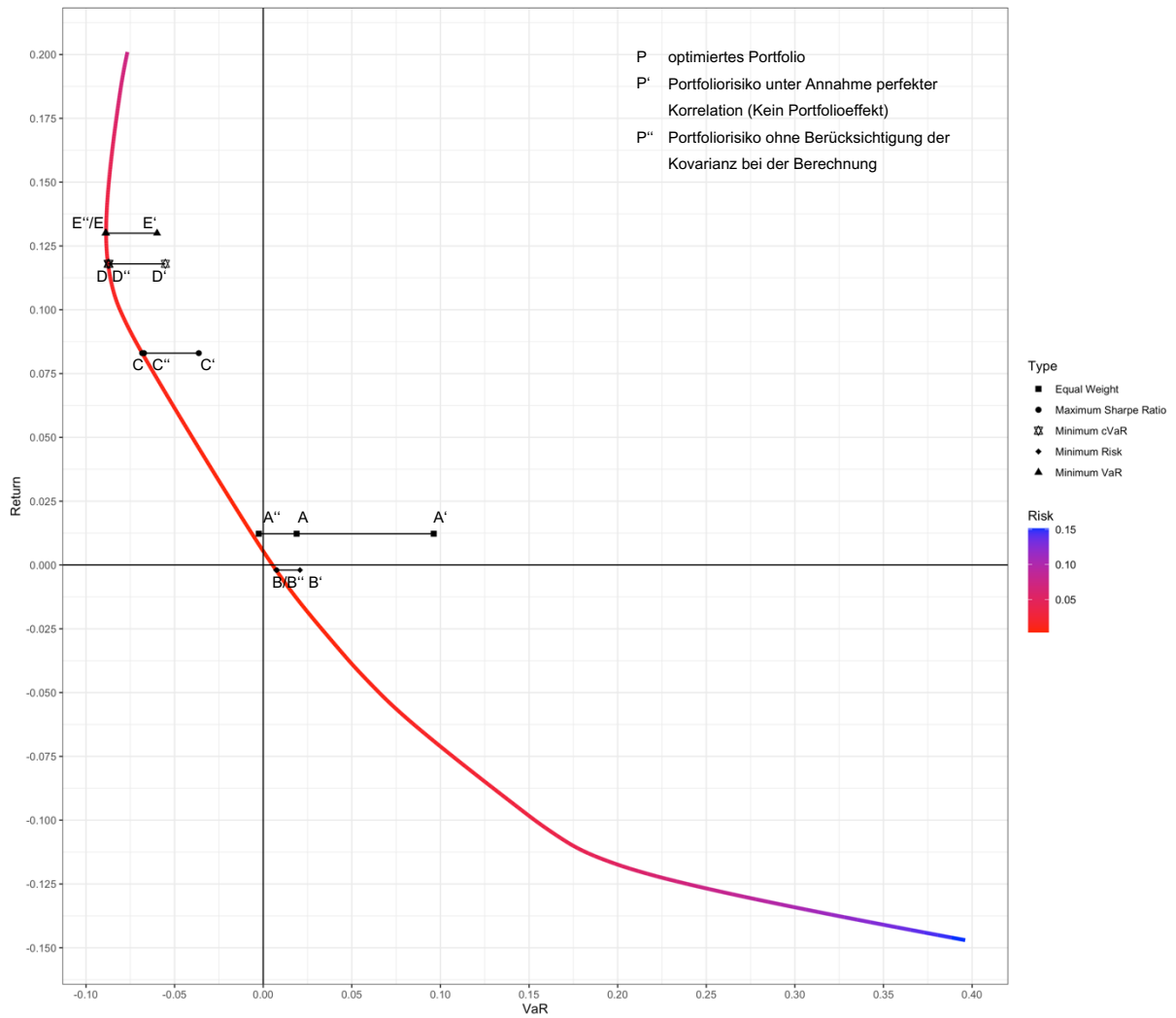


Abbildung 54: Kurve der Rendite-VaR-effizienten Portfolios
 Quelle: Eigene Darstellung

Auch das Diversifikationspotenzial in Bezug auf den Value at Risk wird entsprechend der Referenzpunkte quantifiziert (siehe Tabelle 45). Zum Vergleich ist im Diagramm der Abbildung 54 ebenfalls die durchschnittliche Rendite und der damit verbundene durchschnittliche Value at Risk einer Einzelanlage in Punkt A' dargestellt. Der Mittelwert der Rendite liegt im Durchschnitt bei einer Einzelinvestition bei 1,22% und der Value at Risk im Mittelwert bei 9,62%. Der Referenzpunkt A' entspricht auch hier dem Equal-Weight-Portfolio unter Annahme einer perfekt positiven Korrelation der Biogasanlagen untereinander.

Tabelle 45: Relative Risikoänderung ausgewählter Rendite-VaR-effizienter Portfolios

Portfolio	E(x)	VaR	VaR'	VaR''	VaR-VaR'	relative Risikoänderung
EWP (A)	1,22%	1,89%	9,62%	-0,25%	-7,73	-80%
MVP (B)	-0,20%	0,72%	2,07%	0,79%	-1,35	-65%
MSRP (C)	8,30%	-6,83%	-3,64%	-6,73%	-3,19	-88%
MVaRP (E)	13,00%	-8,86%	-5,99%	-8,90%	-2,87	-48%
MCVaRP (D)	11,80%	-8,76%	-5,52%	-8,70%	-3,24	-59%

Quelle: Eigene Berechnungen

Punkt A zeigt das Equal-Weight-Portfolio unter Berücksichtigung des Diversifikationseffekts. Das Equal-Weight-Portfolio führt ebenfalls zu einer Rendite von 1,22% und ist mit einem Value at Risk von 1,89% verbunden. Durch naive Diversifikation ist demnach gegenüber der Einzelinvestition eine Reduktion des Value at Risk von 7,73%-Punkten möglich. Das Portfolio auf der Effizienzkurve mit einer Rendite von 1,22% ist mit einem Value at Risk von -0,50% verbunden und befindet sich auf dem ineffizienten Teil der Kurve unterhalb des risikominimalen Portfolios.

Punkt A'' beschreibt wiederum das Equal-Weight Portfolio ohne Berücksichtigung der Kovarianz bei der Berechnung des Value at Risk. Wie beim Risikomaß der Standardabweichung liegt der Punkt A'' links neben dem Punkt A. Auch hier führt die im Mittel positive Kovarianz zu einer Risikosteigerung bei naiver Diversifikation. Das Equal-Weight-Portfolio ist ohne Berücksichtigung der Kovarianz mit einem Value at Risk in Höhe von -0,25% verbunden. Der Value at Risk ohne Berücksichtigung der Kovarianz liegt demnach 2,14%-Punkte unter dem Value at Risk des Equal-Weight-Portfolios, bei dem die Kovarianz berücksichtigt wurde. Der durchschnittliche Value at Risk der Einzelanlage und der Value at Risk des Equal-Weight-Portfolios sind positiv. Demnach kann es durch die Schwankungen zu negativen Renditen kommen.

Das risikominimale Portfolio dagegen ist mit einem negativen Value at Risk verbunden und ist auf der Effizienzlinie in Punkt E dargestellt. Der Value at Risk dieses Portfolios liegt bei -8,86% und die Rendite bei 13,00%. Die Reduktion des Value at Risk gegenüber dem Equal-Weight-Portfolio entspricht demnach 10,75%-Punkte und gegenüber der Einzelinvestition 18,48%-Punkte. Die Rendite des Portfolios mit dem niedrigsten Value at Risk liegt 11,78%-Punkte über der Rendite des Equal-Weight-Portfolios und der durchschnittlichen Rendite einer Einzelinvestition.

Um den Portfolioeffekt beim MVaR-Portfolio zu quantifizieren, wurde als Referenz das MVaR-Portfolio unter Annahme einer perfekten Korrelation der Biogasanlagen untereinander berechnet. Der Value at Risk im Punkt E' beträgt -5,99% und liegt damit 2,87%-Punkte über dem des MVaR-Portfolios.

Der Punkt E'' liegt links neben dem MVaR-Portfolio. Im Gegensatz zu E beschreibt E'' den Value at Risk des MVaR-Portfolios ohne Berücksichtigung des Effekts durch die Kovarianz. Das MVaR-Portfolio ist ohne Berücksichtigung der Kovarianz mit einem Value at Risk in Höhe von -8,90% verbunden. Demnach führen die Kovarianzen im MVaR-Portfolio zu einer Risikoreduktion um 0,04%-Punkte.

Um die Wirkung unterschiedlicher Risikomaße einordnen zu können, sind im Diagramm in Abbildung 54 die Portfolios mit der maximalen Sharpe Ratio, der minimalen Varianz, sowie dem minimalen Conditional Value at Risk in den Punkten B, C und D dargestellt. Die drei Portfolios befinden sich im ineffizienten Bereich der Kurve. Das in Punkt B dargestellte

Minimumvarianzportfolio ist mit einer Rendite von -0,20% und einem Value at Risk von 0,72% verbunden. Das in Punkt C dargestellte Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio ist mit einer Rendite von 8,30% und einem Value at Risk von -6,83% verbunden. Die Rendite des MCVaR-Portfolios in Punkt D beträgt 11,80% und der Value at Risk -8,76%.

4.2.1.1.3 Rendite-CVaR-effiziente Portfolios

Wiederum wird die Ausgangssituation und das Anlageuniversum durch Positionierung der Einzelanlagen im Rendite-Risiko-Diagramm beschrieben. Auch das Diagramm in Abbildung 55 weist auf der Ordinate die erwartete Rendite der Biogas-Gesellschaften aus. Auf der Abszisse ist der Conditional Value at Risk bei einem Konfidenzniveau von 5% als Risikomaß dargestellt. Der Conditional Value at Risk kann, wie der Value at Risk, negative Werte annehmen. Er gibt die durchschnittlich zu erwartende Verlusthöhe an, wenn der Value at Risk überschritten wird. Der Mittelwert des Conditional Value at Risk beträgt 12,38%. Von den 93 Biogas-Gesellschaften mit einer überdurchschnittlichen Rendite weisen 67 einen unterdurchschnittlichen Conditional Value at Risk auf, während 26 Biogas-Gesellschaften mit einem überdurchschnittlichen Conditional Value at Risk verbunden sind. Von den 87 unterdurchschnittlich rentablen Biogas-Gesellschaften sind 47 mit einem unterdurchschnittlichen Conditional Value at Risk und 40 mit einem überdurchschnittlichen Conditional Value at Risk verbunden. Insgesamt sind 114 Biogasanlagen mit einem unterdurchschnittlichen Conditional Value at Risk verbunden, während bei 66 Biogasanlagen der Conditional Value at Risk über dem Durchschnitt liegt.



Abbildung 55: Die Biogasanlagen der Stichprobe im Rendite-CVaR-Diagramm

Quelle: Eigene Darstellung

Die Biogasanlagen BGA145 (-6,30%), BGA89 (-5,52%) und BGA161 (-4,47%) haben den geringsten Conditional Value at Risk erzielt, während die Biogasanlagen BGA155 (48,25%), BGA118 (46,80%) und BGA69 (44,41%) den höchsten Conditional Value at Risk erzielt haben.

Lediglich sechs der dargestellten 180 Biogasanlagen sind mit einem Anteil von mindestens 1% in einem Portfolio auf der Effizienzlinie (oberhalb des MVP) enthalten. Diese sind in rot dargestellt. Die in blau dargestellten Biogasanlagen sind in keinem Portfolio auf der Effizienzlinie mit einem Anteil von mehr als 1% enthalten.

Der Conditional Value at Risk stellt eine Weiterentwicklung des Value at Risk dar und berücksichtigt nicht nur die Verlustwahrscheinlichkeit, sondern auch die Verlusthöhe. Die Lösung des Optimierungsproblems für den Conditional Value at Risk führt zu der Effizienzkurve der Abbildung 56. Die Kurve der Rendite-CVaR-effizienten Portfolios unterscheidet sich kaum von der des Value at Risk. Das liegt daran, dass es sich beim Conditional Value at Risk wie beim Value at Risk um ein einseitiges Downside-Risikomaß handelt. Demnach unterscheidet sie sich jedoch genau wie beim Value at Risk deutlich in ihrer Form vom Verlauf der Effizienzkurve beim

Risikomaß der Standardabweichung (siehe Abbildung 52). Der Ast unterhalb des risikominimalen Portfolios verläuft beim Value at Risk und beim Conditional Value at Risk nahezu identisch. Die beiden Effizienzkurven unterscheiden sich in ihrem Verlauf erst oberhalb des risikominimalen Portfolios. Der Teil der Kurve auf dem sich die effizienten Portfolios befinden hat beim Conditional Value at Risk eine geringere Steigung als beim Value at Risk. Der Conditional Value at Risk ordnet diesen Portfolios ein höheres Risiko zu als der Conditional Value at Risk.

Genau wie der Value at Risk kann auch der Conditional Value at Risk negative Werte annehmen. Ein negativer Wert für den Conditional Value at Risk bedeutet, dass in den schlechtesten 5% der Fälle, noch immer eine positive Rendite erwartet werden kann. Wie beim Value at Risk verläuft der Ast der Effizienzkurve, der unterhalb des risikominimalen Portfolios verläuft, im positiven und im negativen Bereich des Diagramms, während der Ast oberhalb des risikominimalen Portfolios ausschließlich im negativen Bereich verläuft. Demnach ist zu erkennen, dass alle effizienten Portfolios auch in den schlechtesten 5% der Fälle noch eine positive Rendite erwarten lassen.

Ebenfalls wie beim Value at Risk kann die Sharpe Ratio nicht analog zur Standardabweichung berechnet und interpretiert werden. Auch im Diagramm in Abbildung 56 wurde deshalb keine Kapitalmarktlinie berücksichtigt. Diese hätte genau wie beim Value at Risk bei einem angenommenen Marktzins von Null eine negative Steigung und das Tangentialportfolio würde sich im ineffizienten Teil der Kurve unterhalb des risikominimalen Portfolios befinden.

Der Farbverlauf der Kurve zeigt neben den beiden Dimensionen Rendite und Conditional Value at Risk die weitere Dimension der Standardabweichung. Es ist zu erkennen, dass der varianzminimale Bereich unterhalb des Portfolios mit dem niedrigsten Conditional Value at Risk liegt. Die Standardabweichung nimmt bis zum Maximum der Kurve zu. Die Portfolios mit dem maximalen Conditional Value at Risk sind wie beim Value at Risk mit der größten Standardabweichung verbunden und auf dem unteren Ast angesiedelt.

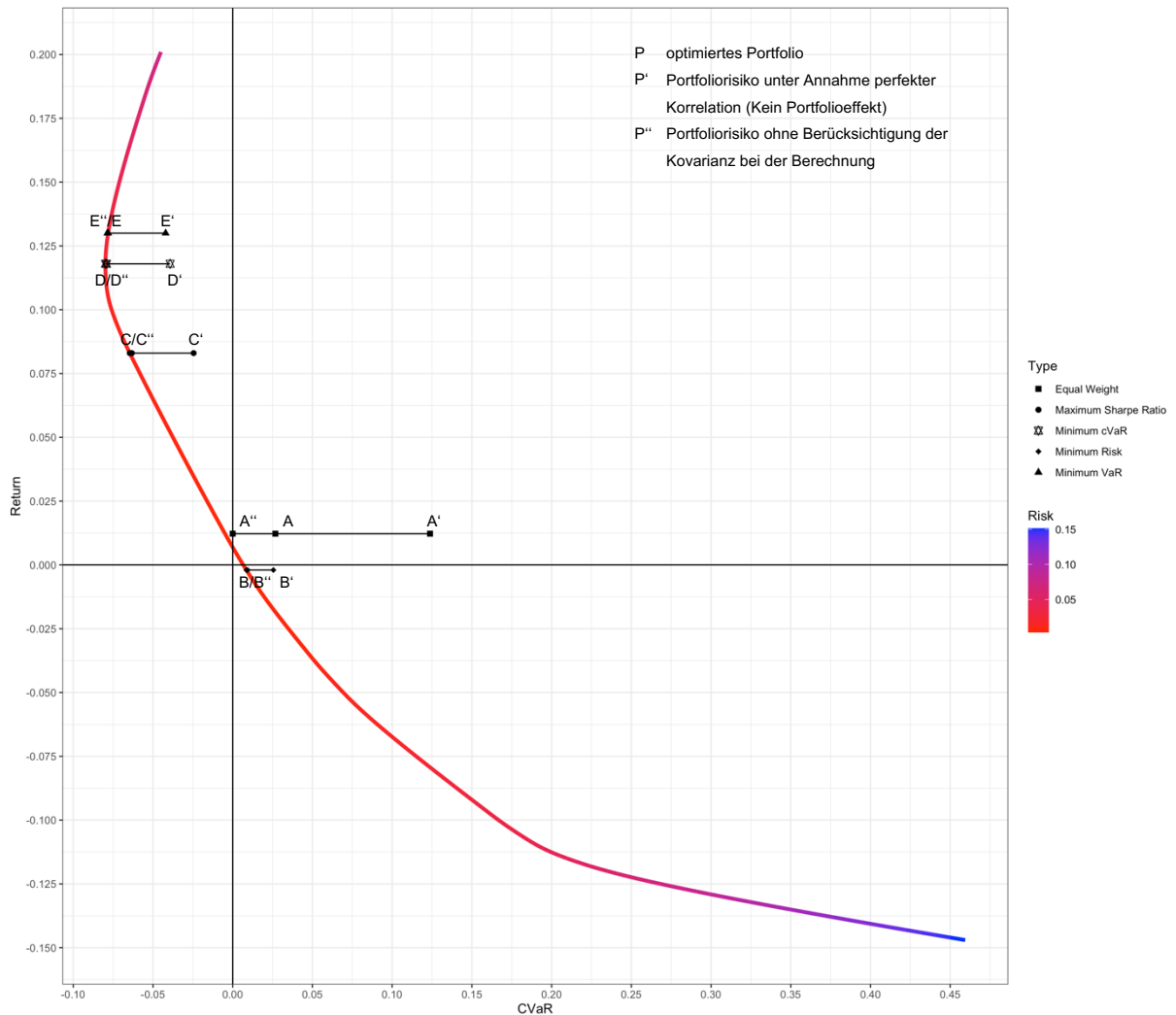


Abbildung 56: Kurve der Rendite-CVaR-effizienten Portfolios

Quelle: Eigene Darstellung

Analog zur Standardabweichung und dem Value at Risk wird auch das Diversifikationspotenzial in Zusammenhang mit dem Conditional Value at Risk quantifiziert (siehe Tabelle 46). Die Investition in eine Einzelanlage ist wie gehabt mit einer Rendite von 1,22% und einem Conditional Value at Risk in Höhe von 12,38% verbunden. Die durchschnittliche Rendite und der durchschnittliche Conditional Value at Risk der Einzelanlage sind in Punkt A' dargestellt.

Tabelle 46: Relative Risikoänderung ausgewählter Rendite-CVaR-effizienter Portfolios

Portfolio	E(x)	CVaR	CVaR'	CVaR''	CVaR'-CVaR	relative Risikoänderung
EWP (A)	1,22%	2,68%	12,38%	0,00%	-9,70	-78%
MVP (B)	-0,20%	0,86%	2,55%	0,94%	-1,69	-66%
MSRP (C)	8,30%	-6,46%	-2,45%	-6,33%	-4,01	-164%
MVaRP (E)	13,00%	-7,81%	-4,21%	-7,86%	-3,60	-86%
MCVaRP (D)	11,80%	-7,98%	-3,93%	-7,91%	-4,05	-103%

Quelle: Eigene Berechnungen

Punkt A zeigt wiederum das Equal-Weight-Portfolio unter Berücksichtigung des Diversifikationseffekts. Dieses ist mit einem geringeren Conditional Value at Risk verbunden als die

Investition in eine Einzelanlage. Bei einer Rendite von 1,22% weist das Equal-Weight-Portfolio einen Conditional Value at Risk in Höhe von 2,68% auf. Durch naive Diversifikation ist demnach gegenüber der Einzelinvestition eine Reduktion des Conditional Value at Risk von 9,70%-Punkten möglich. Das Portfolio auf der Effizienzkurve mit einer Rendite von 1,22% hat einen Conditional Value at Risk von -0,32% und befindet sich auf dem ineffizienten Teil der Kurve unterhalb des risikominimalen Portfolios.

Punkt A“ beschreibt das Equal-Weight-Portfolio ohne Berücksichtigung der Kovarianz bei der Berechnung des Conditional Value at Risk. Wie beim Risikomaß der Standardabweichung und beim Value at Risk liegt der Punkt A“ links neben dem Punkt A. Auch hier führt die im Mittel positive Kovarianz zu einer Risikosteigerung bei naiver Diversifikation. Das Equal-Weight-Portfolio ist ohne Berücksichtigung der Kovarianz mit einem Conditional Value at Risk in Höhe von 0,00% verbunden. Der Conditional Value at Risk ohne Berücksichtigung der Kovarianz liegt demnach 2,68%-Punkte unter dem Conditional Value at Risk des Equal-Weight-Portfolios, bei dem die Kovarianz berücksichtigt wurde. Sowohl der durchschnittliche Conditional Value at Risk der Einzelanlage als auch der Conditional Value at Risk des Equal-Weight-Portfolios sind positiv und lassen demnach negative Renditen in den schlechtesten 5% der Fälle erwarten.

Auf der Effizienzkurve in Punkt D ist das Portfolio mit dem niedrigsten Conditional Value at Risk dargestellt. Es ist mit einem negativen Conditional Value at Risk in Höhe von -7,98% und einer Rendite in Höhe von 11,80% verbunden. Die Reduktion des Conditional Value at Risk gegenüber dem Equal-Weight-Portfolio entspricht demnach 10,66%-Punkte und gegenüber der Einzelinvestition 20,36%-Punkte. Die Rendite des Portfolios mit dem niedrigsten Conditional Value at Risk liegt 10,58%-Punkte über der Rendite des Equal-Weight-Portfolios und der durchschnittlichen Rendite einer Einzelinvestition.

Um den Portfolioeffekt beim MCVaR-Portfolio zu quantifizieren, wurde als Referenz das MCVaR-Portfolio unter Annahme einer perfekten Korrelation der Biogasanlagen untereinander berechnet. Der CVaR im Punkt D' beträgt -3,93% und liegt damit 4,05%-Punkte über dem des MCVaR-Portfolios unter Berücksichtigung des Diversifikationseffektes.

Der Punkt D“ liegt rechts neben dem MCVaR-Portfolio. Im Gegensatz zu D beschreibt D“ den CVaR des MCVaR-Portfolios ohne Berücksichtigung des Effekts durch die Kovarianz. Das MCVaR-Portfolio ist ohne Berücksichtigung der Kovarianz mit einem CVaR in Höhe von -7,91% verbunden. Demnach führen die Kovarianzen im risikominimalen Portfolio zu einer Risikoreduktion um 0,07%-Punkte.

Um die Wirkung unterschiedlicher Risikomaße einordnen zu können, sind im Diagramm in Abbildung 56 die Portfolios mit der maximalen Sharpe Ratio, der minimalen Varianz, sowie dem minimalen Value at Risk in den Punkten B, C und E dargestellt. Die Portfolios mit der maximalen Sharpe Ratio und der minimalen Varianz befinden sich im ineffizienten Bereich der

Kurve. Das MCVaR-Portfolio befindet sich im effizienten Bereich der Kurve. Das in Punkt B dargestellte Minimumvarianzportfolio ist mit einer Rendite von -0,20% und einem Conditional Value at Risk von 0,86% verbunden. Das in Punkt C dargestellte Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio ist mit einer Rendite von 8,30% und einem Conditional Value at Risk von -6,46% verbunden. Die Rendite des MVaR-Portfolios in Punkt E beträgt 13,00% und der Conditional Value at Risk -7,81%.

4.2.1.2 Gewichtung der Einzelanlagen in ausgewählten effizienten Portfolios

Nachdem der Verlauf der Effizienzkurve dargestellt und die optimalen Portfolios identifiziert wurden, wird im Folgenden auf die Zusammensetzung dieser Portfolios eingegangen. Für die Lösung des Optimierungsproblems ist das Renditeniveau vorgegeben. Das führt dazu, dass zum Teil Biogasanlagen mit sehr geringen Gewichtungen in Portfolios enthalten sind, um das vorgegebene Renditeniveau möglichst genau zu erreichen. Da diese Werte die Portfolioeigenschaften nur minimal beeinflussen und es in der Praxis nahezu unmöglich ist so geringe Anteile an einer Biogasanlage zu erwerben, werden in den folgenden Analysen Portfolioanteile ab 1,00% berücksichtigt.

Das Diagramm in Abbildung 57 zeigt auf der X-Achse die vorgegebenen Renditeniveaus, für die das in Kap. 3.2.2.1 beschriebene Optimierungsproblem gelöst wird. Die Zusammensetzung der risikominimalen Portfolios je Renditeniveau ergibt sich aus der Gewichtung, die auf der Y-Achse des Diagramms dargestellt ist. Start- und Endpunkt der Effizienzkurve sind durch die renditeminimale und die renditemaximale Einzelanlage definiert. Diese beiden Extremwerte begrenzen auch das Diagramm in Abbildung 57. Es zeigt ganz links das renditeminimale Portfolio. Zu erkennen ist, dass bei diesem Portfolio die in orange dargestellte Gewichtung einer einzelnen Biogasanlage 100% beträgt. Dabei handelt es sich um BGA118, welches die Biogasanlage mit der minimalen Rendite in Höhe von -14,79% ist. Ganz rechts im Diagramm, beim maximalen Renditeniveau in Höhe von 20,00%, ist BGA161 mit einem Anteil von 100% gewichtet. Bei BGA161 handelt es sich um die Einzelanlage mit der höchsten Rendite. Darüber hinaus sind die Renditeniveaus der Optima bei verschiedenen Risikomaßen im Diagramm markiert.

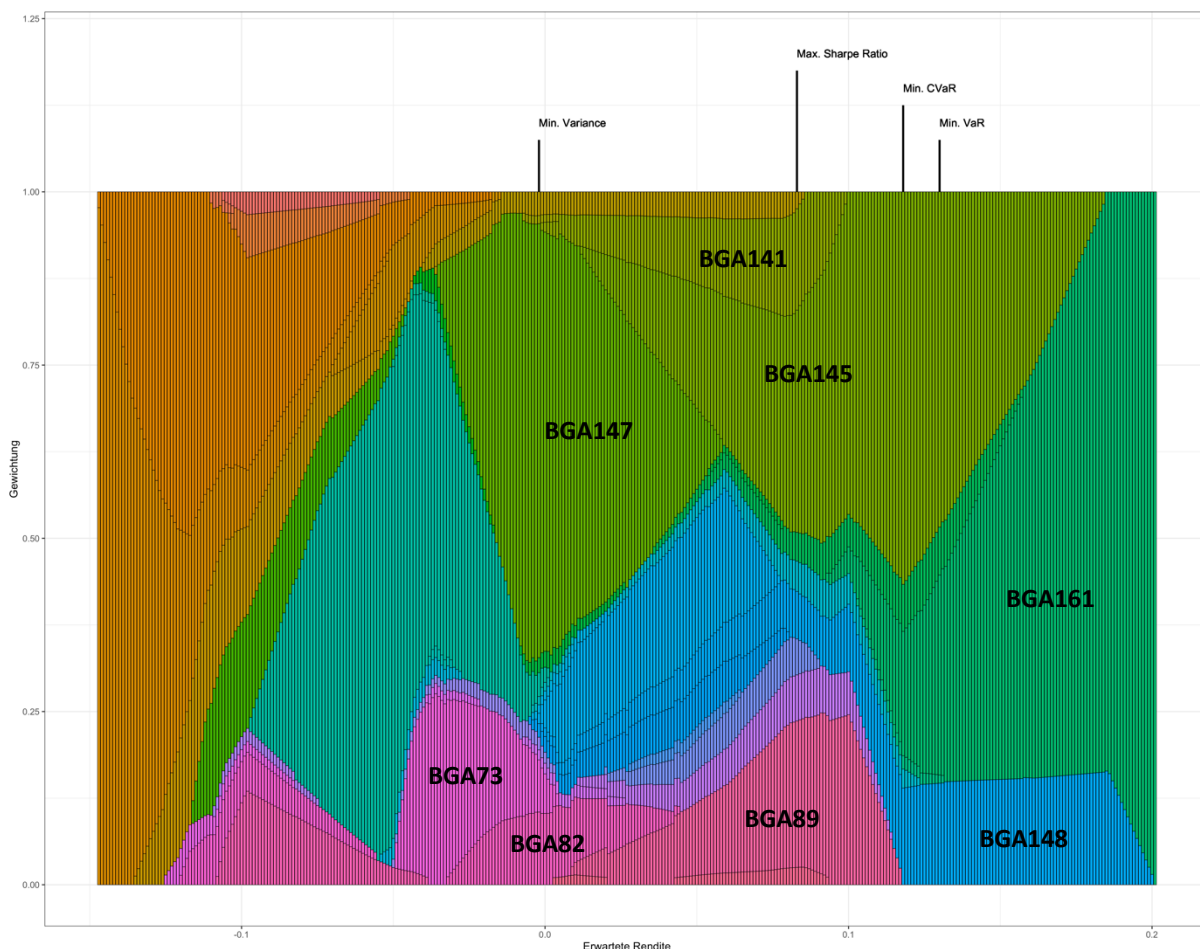


Abbildung 57: Gewichtung der Einzelanlagen in den effizienten Portfolios
 Quelle: Eigene Darstellung

Alle Portfolios auf der Effizienzkurve werden aus 44 der 180 verfügbaren Einzelanlagen gebildet. Die verbleibenden 136 Biogasanlagen sind in keinem Portfolio auf der Effizienzkurve mit einem Anteil von 1,00% oder mehr enthalten. Berücksichtigt man nur den Ast der effizienten Portfolios oberhalb des Minimumvarianzportfolios sind es nur 26 Biogasanlagen, aus denen die Portfolios gebildet werden. Die übrigen 154 Biogasanlagen sind in keinem effizienten Portfolio enthalten. Beim Value at Risk sind es lediglich fünf Biogasanlagen die für die Bildung effizienter Portfolios benötigt werden, während es beim Conditional Value at Risk sechs Biogasanlagen sind. In Tabelle 47 ist dargestellt um welche Biogasanlagen es sich dabei handelt.

Tabelle 47: Einzelanlagen in effizienten Portfolios

	BGA6	BGA16	BGA22	BGA30	BGA32	BGA38	BGA45	BGA48	BGA51	BGA52	BGA55	BGA65	BGA66	BGA73	BGA82	BGA89	BGA90	BGA96	BGA135	BGA138	BGA141	BGA145	BGA147	BGA160	BGA161	BGA171
Effizienzkurve SD	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Effizienzkurve VaR								X														X	X	X	X	
Effizienzkurve CVaR					X			X														X	X	X	X	

Quelle: Eigene Darstellung

Die Anlagen, die sich in den Portfolios auf der Effizienzlinie befinden, sind zusätzlich in den Rendite-Risiko-Diagrammen in Kapitel 4.2.1.1 dargestellt. Zu erkennen ist, dass es sich bei

den genannten Biogasanlagen vorwiegend um solche handelt, die im Risiko-Rendite-Diagramm links oben angeordnet sind. Es handelt sich demnach um Biogasanlagen mit einer hohen Rendite und einem geringen Risiko.

Die Tabelle 48 beschreibt die Gewichtung der Einzelanlagen in den risikominimalen Portfolios und dem Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio. Dargestellt ist, neben der Zusammensetzung des Portfolios mit der maximalen Sharpe Ratio, die Zusammensetzung des Minimumvarianzportfolios, des Portfolios mit dem minimalen Value at Risk und des Portfolios mit dem minimalen Conditional Value at Risk.

Tabelle 48: Gewichtung der Einzelanlagen in den risikominimalen Portfolios und dem Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio

	BGA6	BGA16	BGA22	BGA30	BGA32	BGA38	BGA45	BGA48	BGA51	BGA55	BGA65	BGA66	BGA73	BGA82	BGA89	BGA90	BGA135	BGA138	BGA141	BGA145	BGA147	BGA160	BGA161	BGA171	SUMME		
MVP	1,74%	2,05%	3,24%	1,13%		1,15%	1,41%		1,85%			1,35%	7,11%	9,89%			3,23%		1,11%		59,07%					94,33%	
Max SR					4,29%			6,71%			5,10%	6,52%			20,73%	2,46%	2,39%			14,35%			4,09%			98,12%	
Min VaR								13,86%	14,66%												56,28%	48,39%	31,46%			100,00%	
Min CVaR					2,73%																	6,74%	6,92%	17,83%	28,86%	1,90%	1,18%

Quelle: Eigene Berechnungen

Das Minimumvarianzportfolio enthält 13 Biogasanlagen mit einer Gewichtung zwischen 1,11% und 59,07%. Diese 13 Biogasanlagen machen insgesamt einen Anteil von 94,33% des Minimumvarianzportfolios aus. Die Analyse der effizienten Portfolios in Kapitel 4.2.1.1 hat gezeigt, dass ein Großteil der Risikoreduktion auf die Gewichtung der Einzelanlagen zurückzuführen ist. Demzufolge ist die Biogasanlage BGA147 mit der minimalen Standardabweichung im Minimumvarianzportfolio mit 59,07% am stärksten gewichtet. Die nächstniedrigere Gewichtung weist BGA82 mit 9,89% auf. Auch bei der BGA82 handelt es sich um eine Biogasanlage mit einer geringen Standardabweichung. Im Vergleich mit allen anderen Biogasanlagen dieser Untersuchung liegt sie auf Rang fünf. Die Biogasanlage BGA73 macht einen Anteil von 7,11% des Minimumvarianzportfolios aus und liegt damit auf Rang drei der Gewichtungen. Auch bei dieser Anlage handelt es sich um eine Anlage mit einer geringen Standardabweichung. Sie liegt bei 0,98% und damit auf Rang vier im Vergleich mit den anderen Biogasanlagen dieser Untersuchung.

Das Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio enthält zehn Biogasanlagen mit einer Gewichtung zwischen 2,39% und 31,46%. Diese zehn Anlagen machen insgesamt einen Anteil von 98,12% am Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio aus. Das Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio ist durch die Biogasanlage BGA145 dominiert. Diese macht einen Anteil von

31,46% am Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio aus. Bei BGA145 handelt es sich um die Biogasanlage mit der zweithöchsten Sharpe Ratio im Vergleich mit den anderen Biogasanlagen dieser Untersuchung. Auf Rang zwei folgt Biogasanlage BGA89 mit einer Gewichtung von 20,73%. Bei dieser Anlage handelt es sich um die Anlage mit der höchsten Sharpe Ratio. Mit einer Gewichtung von 14,35% ist BGA141 auf Rang drei. Die Biogasanlage BGA141 ist, bezogen auf die Sharpe Ratio, auf Rang vier im Vergleich mit den anderen Anlagen.

Das Portfolio mit dem minimalen Value at Risk enthält fünf Biogasanlagen mit einer Gewichtung zwischen 1,18% und 48,39%. Diese fünf Anlagen machen insgesamt einen Anteil von 100% am Portfolio mit dem minimalen Value at Risk aus. Die Biogasanlage BGA145 ist mit 48,39% am stärksten gewichtet. Bei BGA145 handelt es sich um die Biogasanlage mit dem zweitgeringsten Value at Risk. Auf Rang zwei liegt BGA161 mit einer Gewichtung von 28,86% und auf Rang drei BGA48 mit 14,66%. Bei BGA 161 handelt es sich nicht nur um die Anlage mit der maximalen Rendite, sondern auch mit dem geringsten Value at Risk. BGA48 liegt im Vergleich mit den anderen Biogasanlagen dieser Untersuchung auf Rang vier.

Das Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk enthält sechs Biogasanlagen mit einer Gewichtung zwischen 1,90% und 56,28%. Diese sechs Anlagen machen insgesamt einen Anteil von 99,34% des Portfolios mit dem minimalen Conditional Value at Risk aus. Die Biogasanlage BGA145 ist mit 56,28% am stärksten gewichtet. Bei BGA145 handelt es sich um die Biogasanlage mit dem minimalen Conditional Value at Risk. Auf Rang zwei liegt BGA161 mit einer Gewichtung von 17,83% und auf Rang drei BGA48 mit 13,86%. BGA161 liegt auf Rang drei im Vergleich mit den anderen Anlagen dieser Untersuchung und BGA48 auf Rang vier.

4.2.1.3 Kovarianzen der Biogasanlagen in effizienten Portfolios

Minimumvarianzportfolio

Neben den Risiken der Einzelanlagen beeinflussen die Kovarianzen als Maß für den Zusammenhang das Portfoliorisiko. Um den Effekt der Kovarianzen auf die Risikoveränderung zu untersuchen, sind in der Tabelle 50 die Kovarianzen der Biogasanlagen, die sich im Minimumvarianzportfolio befinden, abgebildet. Die Verteilung der Kovarianzen im Minimumvarianzportfolio ist in der deskriptiven Statistik in Tabelle 49 zusammengefasst.

Tabelle 49: Deskriptive Statistik der Kovarianzen im Minimumvarianzportfolio

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Kovarianzen MVP	8,35E-06	7,90E-05	-3,06E-04	-1,49E-05	5,67E-06	3,26E-05	2,89E-04	78
Kovarianzen Stichprobe	3,20E-04	1,35E-03	-1,76E-02	-8,00E-05	1,30E-04	5,30E-04	2,18E-02	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Mittelwert der Kovarianzen im Minimumvarianzportfolio beträgt 0,0000083. Von den 78 Kovarianzwerten in der Matrix sind 43 positiv und 35 negativ. Eine vergleichsweise stark

negative Kovarianz weisen BGA30 und BGA135 mit $-0,00031$ auf. Die Maximale Kovarianz im Minimumvarianzportfolio weisen BGA6 und BGA30 mit $0,00029$ auf.

Tabelle 50: Kovarianzmatrix der Biogasanlagen im Minimumvarianzportfolio (Korrelationsmatrix siehe Anhang 9 auf CD-ROM/USB-Stick)

	BGA6	BGA16	BGA22	BGA30	BGA38	BGA45	BGA51	BGA66	BGA73	BGA82	BGA135	BGA138	BGA147
BGA6		$6,00E-07$	$1,15E-05$	$2,89E-04$	$9,34E-05$	$1,35E-05$	$4,41E-05$	$6,35E-05$	$3,51E-05$	$4,86E-05$	$-1,55E-04$	$1,56E-04$	$-3,89E-05$
BGA16			$4,01E-06$	$-4,00E-05$	$-1,57E-04$	$1,37E-05$	$2,85E-06$	$-1,33E-04$	$9,14E-05$	$-2,56E-05$	$-1,02E-05$	$-4,15E-05$	$-2,73E-06$
BGA22				$2,26E-05$	$1,77E-05$	$6,60E-06$	$2,88E-05$	$1,84E-05$	$8,16E-06$	$1,31E-06$	$1,27E-05$	$-1,70E-05$	$8,13E-06$
BGA30					$1,24E-04$	$3,52E-06$	$6,95E-05$	$-3,55E-06$	$4,95E-05$	$1,08E-04$	$-3,06E-04$	$-1,01E-04$	$-2,14E-05$
BGA38						$-1,34E-05$	$5,53E-05$	$2,54E-04$	$-2,91E-05$	$9,78E-05$	$-1,62E-04$	$-3,40E-05$	$-8,51E-06$
BGA45							$4,73E-06$	$-1,45E-05$	$2,96E-05$	$3,61E-06$	$2,15E-05$	$-1,25E-06$	$1,10E-05$
BGA51								$8,32E-05$	$2,95E-06$	$1,62E-05$	$-3,69E-05$	$3,37E-05$	$1,13E-05$
BGA66									$-3,33E-05$	$8,97E-05$	$-1,50E-05$	$3,81E-05$	$-1,13E-05$
BGA73										$-9,48E-06$	$-1,82E-05$	$2,24E-05$	$2,61E-06$
BGA82											$-7,35E-05$	$1,90E-05$	$-1,43E-05$
BGA135												$5,01E-05$	$7,68E-06$
BGA138													$-2,19E-05$
BGA147													

Quelle: Eigene Berechnungen

BGA147 weist im MVP die höchste Gewichtung auf. In Tabelle 50 ist zu erkennen, dass diese Biogasanlage mit den anderen Biogasanlagen im MVP nahezu unkorreliert ist. Die Kovarianz zwischen BGA147 und den übrigen BGA im MVP ist im Mittel leicht negativ und beträgt $-6,52E-06$. Besonders ins Auge fallen die fast ausschließlich negativen Kovarianzen zwischen der BGA135 und den übrigen BGA im MVP. Mit einem Mittelwert von $-6,15E-05$ weist BGA135 den niedrigsten Mittelwert der Kovarianzen auf.

Tabelle 51 zeigt den Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz unter Berücksichtigung der Gewichtung der Einzelanlagen im Portfolio. Da BGA147 im MVP am stärksten gewichtet ist, beeinflussen die Kovarianzen zwischen der BGA147 und den übrigen Biogasanlagen im MVP, die Gesamtänderung in Höhe von $-1,61E-06$ am stärksten.

Tabelle 51: Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz im Minimumvarianzportfolio

	BGA6	BGA16	BGA22	BGA30	BGA38	BGA45	BGA51	BGA66	BGA73	BGA82	BGA135	BGA138	BGA147
BGA6		$4,27E-10$	$1,30E-08$	$1,13E-07$	$3,73E-08$	$6,63E-09$	$2,83E-08$	$2,99E-08$	$8,67E-08$	$1,67E-07$	$-1,74E-07$	$6,01E-08$	$-7,99E-07$
BGA16			$5,32E-09$	$-1,85E-08$	$-7,38E-08$	$7,92E-09$	$2,16E-09$	$-7,39E-08$	$2,66E-07$	$-1,04E-07$	$-1,35E-08$	$-1,89E-08$	$-6,60E-08$
BGA22				$1,66E-08$	$1,32E-08$	$6,03E-09$	$3,45E-08$	$1,61E-08$	$3,76E-08$	$8,41E-09$	$2,65E-08$	$-1,23E-08$	$3,11E-07$
BGA30					$3,22E-08$	$1,12E-09$	$2,90E-08$	$-1,08E-09$	$7,95E-08$	$2,42E-07$	$-2,23E-07$	$-2,53E-08$	$-2,86E-07$
BGA38						$-4,34E-09$	$2,35E-08$	$7,91E-08$	$-4,75E-08$	$2,22E-07$	$-1,20E-07$	$-8,68E-09$	$-1,15E-07$
BGA45							$2,46E-09$	$-5,55E-09$	$5,93E-08$	$1,01E-08$	$1,96E-08$	$-3,93E-10$	$1,82E-07$
BGA51								$4,16E-08$	$7,74E-09$	$5,92E-08$	$-4,40E-08$	$1,38E-08$	$2,47E-07$
BGA66									$-6,42E-08$	$2,40E-07$	$-1,31E-08$	$1,15E-08$	$-1,81E-07$
BGA73										$-1,33E-07$	$-8,35E-08$	$3,53E-08$	$2,19E-07$
BGA82											$-4,70E-07$	$4,18E-08$	$-1,67E-06$
BGA135												$3,59E-08$	$2,93E-07$
BGA138													$-2,87E-07$
BGA147													

Quelle: Eigene Berechnungen

Maximale Sharpe-Ratio Portfolio

Tabelle 53 zeigt die Kovarianzen zwischen Biogasanlagen, die sich im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio befinden. Die Verteilung der Kovarianzen im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio lässt sich mit der deskriptiven Statistik in Tabelle 52 zusammenfassen.

Tabelle 52: Deskriptive Statistik der Kovarianzen im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Kovarianzen MSRP	-1,66E-05	3,79E-04	-6,64E-04	-2,89E-04	-1,31E-05	1,26E-04	1,31E-03	45
Kovarianzen Stichprobe	3,20E-04	1,35E-03	-1,76E-02	-8,00E-05	1,30E-04	5,30E-04	2,18E-02	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Mittelwert der Kovarianzen der Biogasanlagen, die sich im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio befinden, beträgt $-1,66E-05$. Von den 45 Kovarianzwerten in der Matrix sind 22 positiv und 23 negativ. Eine vergleichsweise stark negative Kovarianz weisen BGA32 und BGA141 mit $-6,64E-04$ auf. Die maximale Kovarianz im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio weisen BGA32 und BGA160 mit $1,31E-03$ auf.

Tabelle 53: Kovarianzmatrix der Biogasanlagen im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio (Korrelationsmatrix siehe Anhang 9 auf CD-ROM/USB-Stick)

	BGA32	BGA48	BGA55	BGA65	BGA89	BGA90	BGA135	BGA141	BGA145	BGA160
BGA32		-5,02E-04	9,92E-04	3,28E-04	5,58E-05	-2,93E-04	-7,92E-05	-6,64E-04	-3,79E-04	1,31E-03
BGA48			-5,25E-04	-3,35E-04	1,32E-04	3,23E-04	-3,63E-04	2,03E-04	3,81E-05	-5,32E-04
BGA55				1,45E-04	-1,31E-05	-1,78E-04	-4,98E-05	-3,39E-04	-1,06E-04	8,72E-04
BGA65					4,86E-05	-1,35E-04	-2,89E-04	-1,21E-04	-2,03E-04	1,40E-04
BGA89						3,00E-05	-5,02E-05	1,56E-05	4,99E-05	3,71E-05
BGA90							1,26E-04	2,26E-04	1,47E-05	-3,66E-04
BGA135								2,00E-04	5,30E-05	-1,69E-04
BGA141									1,18E-04	-4,56E-04
BGA145										-5,90E-05
BGA160										

Quelle: Eigene Berechnungen

BGA145 ist im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio am stärksten gewichtet. Die Kovarianz zwischen BGA145 und den übrigen BGA im MVP ist im Mittel leicht negativ und beträgt $-9,67E-05$. Neben den Kovarianzen zwischen den Einzelanlagen im Portfolio wird die Gesamtänderung der Varianz durch deren Gewichtung bestimmt. Die Biogasanlage BGA145 weist vergleichsweise geringe Kovarianzen auf, die durch die starke Gewichtung die Gesamtänderung von $-1,04E-05$ maßgeblich beeinflussen. Die „extremen“ Kovarianzen der Anlagen BGA55 und BGA160 beeinflussen die Gesamtänderung durch die geringe Gewichtung kaum (siehe Tabelle 54).

Tabelle 54: Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio

	BGA32	BGA48	BGA55	BGA65	BGA89	BGA90	BGA135	BGA141	BGA145	BGA160
BGA32		-2,89E-06	4,35E-06	1,84E-06	9,94E-07	-6,18E-07	-1,63E-07	-8,18E-06	-1,02E-05	4,59E-06
BGA48			-3,60E-06	-2,94E-06	3,67E-06	1,07E-06	-1,17E-06	3,91E-06	1,61E-06	-2,92E-06
BGA55				9,67E-07	-2,76E-07	-4,46E-07	-1,22E-07	-4,97E-06	-3,40E-06	3,64E-06
BGA65					1,31E-06	-4,33E-07	-9,03E-07	-2,26E-06	-8,33E-06	7,45E-07
BGA89						3,06E-07	-4,98E-07	9,29E-07	6,51E-06	6,29E-07
BGA90							1,49E-07	1,60E-06	2,28E-07	-7,35E-07
BGA135								1,37E-06	7,98E-07	-3,30E-07
BGA141									1,06E-05	-5,35E-06
BGA145										-1,52E-06
BGA160										

Quelle: Eigene Berechnungen

Minimum Value at Risk Portfolio

Im Gegensatz zu dem varianzminimalen Portfolio und dem mit der maximalen Sharpe Ratio ist beim Portfolio mit dem minimalen Value at Risk keine Risikoreduktion durch Kovarianzen zu beobachten. Tabelle 56 zeigt die Kovarianzen zwischen Biogasanlagen, die sich im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk befinden. Die Verteilung der Kovarianzen im Minimum-Value-at-Risk-Portfolio lässt sich mit der deskriptiven Statistik in Tabelle 55 zusammenfassen.


Tabelle 55: Deskriptive Statistik der Kovarianzen im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Kovarianzen MVaRP	-9,21E-05	9,07E-04	-1,09E-03	-5,73E-04	-5,81E-05	5,61E-05	2,16E-03	10
Kovarianzen Stichprobe	3,20E-04	1,35E-03	-1,76E-02	-8,00E-05	1,30E-04	5,30E-04	2,18E-02	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Mittelwert der Kovarianzen der Biogasanlagen, die sich im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk befinden, beträgt -9,21E-05. Von den zehn Kovarianzwerten in der Matrix sind vier positiv und sechs negativ. Eine vergleichsweise stark negative Kovarianz weisen BGA48 und BGA171 mit -1,09E-03 auf. Die maximale Kovarianz im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk weisen BGA160 und BGA171 mit 2,16E-03 auf.

Tabelle 56: Kovarianzmatrix der Biogasanlagen im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk (Korrelationsmatrix siehe Anhang 9 auf CD-ROM/USB-Stick)

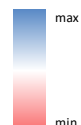


	BGA48	BGA145	BGA160	BGA161	BGA171
BGA48		3,81E-05	-5,32E-04	-5,71E-05	-1,09E-03
BGA145			-5,90E-05	1,40E-04	-9,95E-04
BGA160				6,21E-05	2,16E-03
BGA161					-5,87E-04
BGA171					

Quelle: Eigene Berechnungen

Auch beim Portfolio mit dem minimalen Value at Risk wurde in Kapitel 4.2.1.2 der Einfluss der Kovarianz auf die Änderung der Varianz ermittelt. Die Formel für die Berechnung des Value at Risk beinhaltet die Standardabweichung. Ersetzt man in der Formel die Standardabweichung durch die Portfoliovarianz mit und ohne Berücksichtigung der Kovarianz, lässt sich eine Änderung der Varianz ableiten. Die Änderung der Varianz ist für das Portfolio mit dem minimalen Value at Risk positiv und beträgt 1,19E-05. Wie sich diese Änderung der Varianz zusammensetzt, ist in der Tabelle 57 dargestellt.

Tabelle 57: Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk



	BGA48	BGA145	BGA160	BGA161	BGA171
BGA48		5,41E-06	-1,08E-05	-4,83E-06	-3,77E-06
BGA145			-3,95E-06	3,92E-05	-1,14E-05
BGA160				2,48E-06	3,53E-06
BGA161					-4,00E-06
BGA171					

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Kovarianz zwischen BGA145 und BGA161 ist positiv. Durch die starke Gewichtung (48,39% und 28,86%) tragen die genannten Biogasanlagen wesentlich zur Änderung der Varianz bei. Beim Portfolio mit dem minimalen Value at Risk überwiegen die gewichteten positiven Kovarianzen gegenüber den gewichteten negativen Kovarianzen, sodass die Summe der Änderungen der Varianz positiv ist.

Minimum Conditional Value at Risk Portfolio

Beim Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk ist wiederum eine Risikoreduktion durch Kovarianzen zu beobachten. Tabelle 59 zeigt die Kovarianzen zwischen Biogasanlagen, die sich im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk befinden. Die Verteilung der Kovarianzen im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk lässt sich mit der deskriptiven Statistik in Tabelle 58 zusammenfassen.

Tabelle 58: Deskriptive Statistik der Kovarianzen im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Kovarianzen MCVaRP	1,92E-04	1,19E-03	-1,09E-03	-5,17E-04	-5,71E-05	1,19E-04	3,28E-03	15
Kovarianzen Stichprobe	3,20E-04	1,35E-03	-1,76E-02	-8,00E-05	1,30E-04	5,30E-04	2,18E-02	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Mittelwert der Kovarianzen der BGA die sich im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk befinden, beträgt 1,92E-04. Von den 15 Kovarianzwerten in der Matrix sind sieben Werte positiv und acht Werte negativ. Eine vergleichsweise stark negative Kovarianz weisen BGA48 und BGA171 mit -1,09E-03 auf. Die maximale Kovarianz im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk weisen BGA32 und BGA171 mit 3,28E-03 auf.

Tabelle 59: Kovarianzmatrix der Biogasanlagen im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk (Korrelationsmatrix siehe Anhang 9 auf CD-ROM/USB-Stick)

	BGA32	BGA48	BGA145	BGA160	BGA161	BGA171
BGA32		-5,02E-04	-3,79E-04	1,31E-03	9,70E-05	3,28E-03
BGA48			3,81E-05	-5,32E-04	-5,71E-05	-1,09E-03
BGA145				-5,90E-05	1,40E-04	-9,95E-04
BGA160					6,21E-05	2,16E-03
BGA161						-5,87E-04
BGA171						

Quelle: Eigene Berechnungen

Wie sich die Gesamtänderung der Varianz in Höhe von 1,34E-05 zusammensetzt ist Tabelle 60 zu entnehmen. Durch die geringe Gewichtung der Biogasanlage BGA171 beeinflussen die extremen Kovarianzwerte die Gesamtänderung kaum, während die Kovarianzen mit der Biogasanlage BGA145 die Gesamtänderung dominieren.

Tabelle 60: Beitrag der Kovarianzen zur Gesamtänderung der Varianz im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk

	BGA32	BGA48	BGA145	BGA160	BGA161	BGA171
BGA32		-3,80E-06	-1,16E-05	4,82E-06	9,45E-07	3,40E-06
BGA48			5,95E-06	-9,94E-06	-2,82E-06	-5,73E-06
BGA145				-4,47E-06	2,82E-05	-2,13E-05
BGA160					1,49E-06	5,52E-06
BGA161						-3,98E-06
BGA171						

Quelle: Eigene Berechnungen

4.2.2 Portfolioeffekt bei naiver Diversifikation

4.2.2.1 Beitrag von Einzelanlagen auf die Standardabweichung als Risikomaß eines Portfolios

Abbildung 58 zeigt die durchschnittliche Standardabweichung von naiv diversifizierten Biogas-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße. Erwartungsgemäß sinkt das Risiko mit zunehmender Portfoliogröße. Betrachtet man die Änderung der Standardabweichung, ist zu erkennen, dass diese bereits ab einer Portfoliogröße von ungefähr 15 Einzelanlagen nur noch minimal ist. Die Investition in eine zusätzliche Biogasanlage ist dann nur noch mit einer sehr geringen Risikoreduktion verbunden.

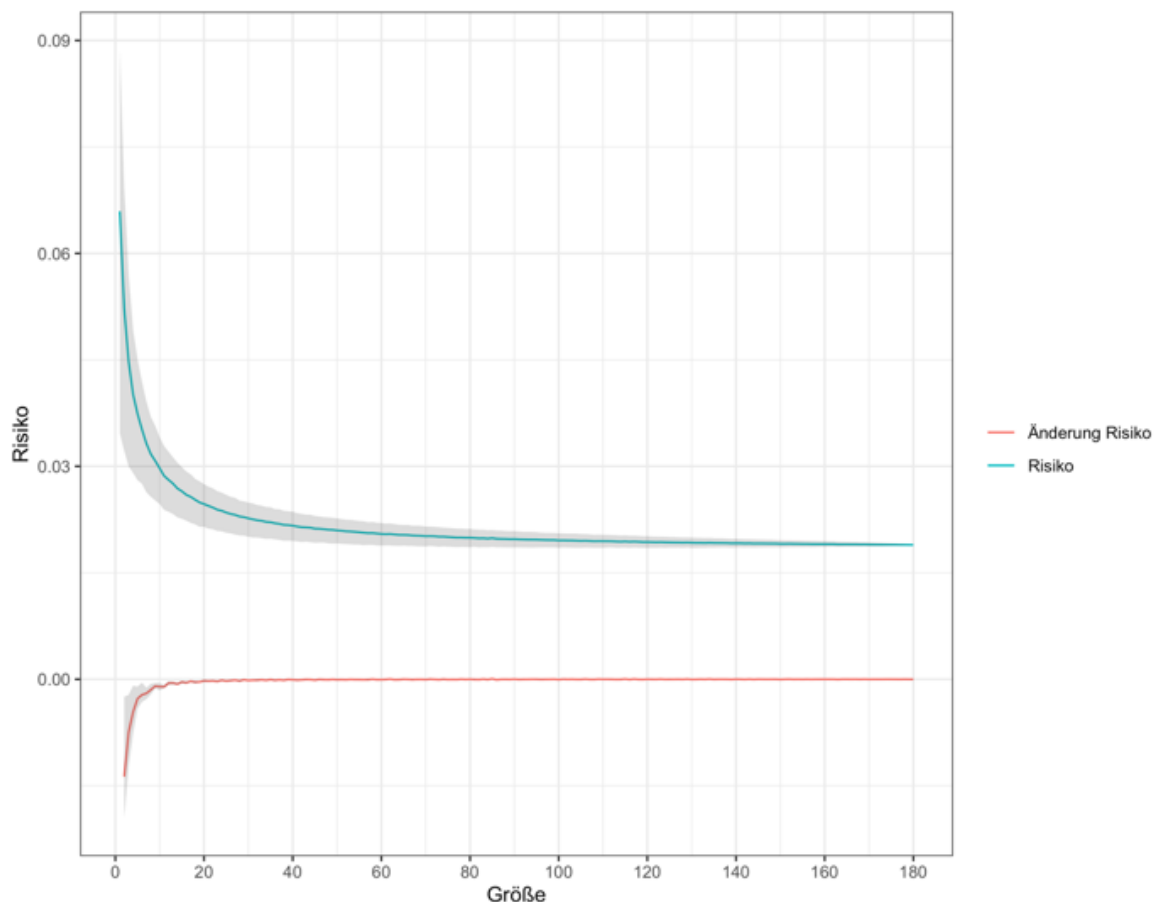


Abbildung 58: Standardabweichung naiv diversifizierter Biogasanlagen-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße

Quelle: Eigene Darstellung

Zur Untersuchung des Beitrags von Einzelanlagen auf die Änderung der Standardabweichung als Risikomaß eines Portfolios wird zunächst die Ausgangssituation durch die deskriptive Statistik der Bestandsportfolios dargestellt (siehe Tabelle 61).

Tabelle 61: Deskriptive Statistik der Standardabweichungen der Bestandsportfolios (Ausgangssituation)

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Risiko (SD) Bestandsportfolios (1)	0,0668	0,0443	0,0062	0,0355	0,0509	0,0891	0,2440	180
Risiko (SD) Bestandsportfolios (5)	0,0375	0,0123	0,0113	0,0284	0,0366	0,0450	0,0899	1.000
Risiko (SD) Bestandsportfolios (10)	0,0295	0,0073	0,0119	0,0242	0,0291	0,0340	0,0593	1.000
Risiko (SD) Bestandsportfolios (20)	0,0246	0,0046	0,0142	0,0213	0,0241	0,0274	0,0411	1.000

Quelle: Eigene Berechnungen

Erwartungsgemäß zeigt auch die deskriptive Statistik, dass der Mittelwert des Risikos der Zufallsportfolios mit zunehmender Portfoliogröße sinkt. Bei den Einzelanlagen liegt die Standardabweichung als Risikomaß im Mittel bei 6,68%, während es bei einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen im Mittel bei nur 2,46% liegt. Ebenfalls verringert sich die Standardabweichung des Risikos mit zunehmender Portfoliogröße. Das Risiko streut weniger und die Bestandsportfolios werden sich in Bezug auf das Risiko mit zunehmender Portfoliogröße ähnlicher. So liegen 50% der Werte im Bereich zwischen 2,13% und 2,74% bei einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen, während bei den Einzelanlagen 50% der Werte im Bereich von 3,55% und 8,91% liegen. Dennoch ist zu erkennen, dass die geringste Standardabweichung als Risikomaß in Höhe von 0,62% mit einer Einzelanlage erzielt werden kann. Im Gegensatz zum Minimumvarianzportfolio (Kapitel 4.2.1.1) wird die Standardabweichung der risikominimalen Einzelanlage durch naive Diversifizierung nicht unterschritten. Das liegt an der zufälligen Kombination der Anlagen, der identischen Gewichtung der Einzelanlagen in den Bestandsportfolios und der Tatsache, dass die Kovarianzen, im Gegensatz zur Gewichtung im Durchschnitt, eine untergeordnete Rolle bei der Risikoänderung spielen. Hinzu kommt, dass die Kovarianzen im Mittelwert positiv sind und dadurch zu einer Steigerung des Risikos führen können. Auch die maximale Standardabweichung als Risikomaß in Höhe von 24,40% ist mit einer Einzelanlage verbunden. Insgesamt liegen die Minimalwerte näher beieinander als die Maximalwerte.

Wenn, ausgehend von den beschriebenen Bestandsportfolios, in eine weitere Biogasanlage investiert wird, entstehen neue Zufallsportfolios. Die Eigenschaften der Standardabweichung als Risikomaß dieser Portfolios sind durch die Statistik in Tabelle 62 beschrieben.

Tabelle 62: Deskriptive Statistik der Standardabweichungen der Zufallsportfolios nach der zusätzlichen Investition

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Risiko (SD) Simulation (2)	0,0522	0,0255	0,0072	0,0319	0,0463	0,0691	0,1703	32220
Risiko (SD) Simulation (6)	0,0351	0,0106	0,0087	0,0272	0,0343	0,0418	0,0985	175000
Risiko (SD) Simulation (11)	0,0287	0,0068	0,0104	0,0238	0,0282	0,0328	0,0648	170000
Risiko (SD) Simulation (21)	0,0243	0,0045	0,0133	0,0211	0,0239	0,0271	0,0443	160000

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Mittelwerte der Standardabweichung als Risikomaß der Zufallsportfolios nach der Simulation sind etwas geringer als die der Mittelwerte der Bestandsportfolios. Die Streuung um diesen Mittelwert nimmt durch die zusätzliche Investition erwartungsgemäß ab. Bei den Einzelanlagen nimmt die Spannweite im Vergleich zu den Bestandsportfolios ab, während sie ab einer Portfoliogröße von fünf Biogasanlagen zunimmt. Außer bei den Einzelanlagen steigert die zusätzliche Investition den Maximalwert der Portfoliorisikos. Das ist auf die naive Diversifizierung und die Tatsache zurückzuführen, dass Biogasanlagen positiv kovariieren. Der Median der Standardabweichung als Risikomaß ist nach der Simulation etwas geringer als der Median der Bestandsportfolios. Die zusätzliche Investition, ausgehend von den Einzelanlagen, führt im Mittel dazu, dass die Standardabweichung als Risikomaß um 1,46%-Punkte sinkt. Ausgehend von den Bestandsportfolios mit fünf Anlagen sind es nur 0,24%-Punkte, von zehn auf elf noch 0,08%-Punkte und 20 auf 21 nur noch 0,03%-Punkte. Die Differenz der Standardabweichung als Risikomaß zwischen den Einzelanlagen und den Portfolios mit fünf Anlagen liegt im Mittel bei 2,93%-Punkten. Ausgehend von einer Einzelanlage führt die zusätzliche Investition in eine weitere Anlage bereits zu einer Risikoreduzierung von 1,46%-Punkten. Das entspricht bereits der Hälfte der Differenz zu den Portfolios mit fünf Anlagen.

Im Folgenden wird die Häufigkeitsverteilung der Risikoänderung untersucht. Die Histogramme in Abbildung 59 zeigen die Änderung der Standardabweichung als Risikomaß bei verschiedenen Portfoliogrößen.

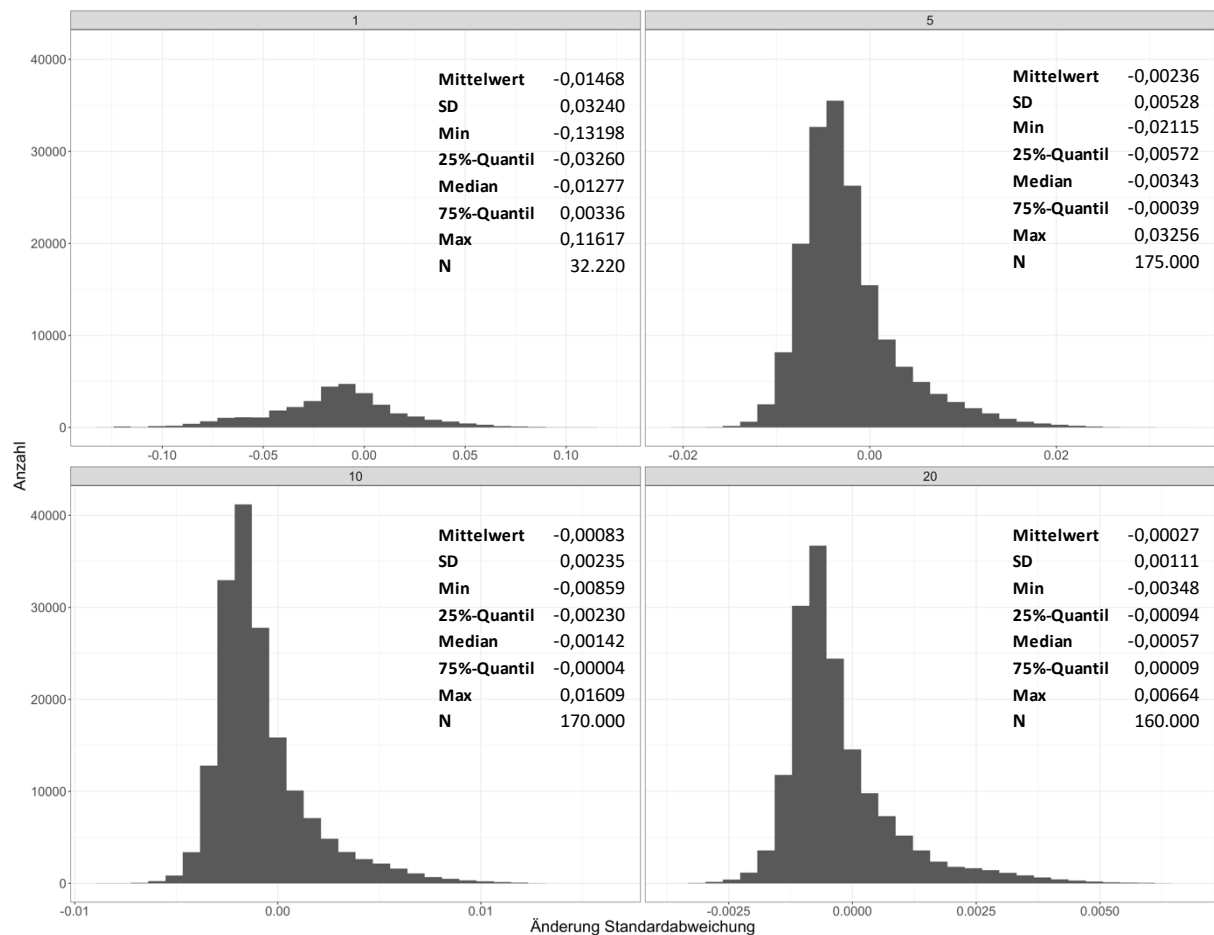


Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der Risikoänderung (SD) durch die zusätzliche Investition bei unterschiedlichen Portfoliogrößen
Quelle: Eigene Darstellung

Der Mittelwert der Änderung des Risikos ist bei allen Portfoliogrößen negativ. Das heißt im Mittel konnte das Risiko durch eine zusätzliche Investition reduziert werden. Das 75%-Quantil ist bei allen Portfoliogrößen nahe null. Demnach wird das Risiko in 75% der Fälle nicht erhöht oder sogar reduziert. Außer im Falle der Einzelanlagen, weisen alle anderen Portfoliogrößen eine rechtsschiefe Verteilung auf. Ein Großteil der Verteilungsmasse liegt unter null. Bei den Änderungen der Standardabweichungen, die über null liegen und das Risiko erhöhen, ist der Bereich der Realisationen größer als bei negativen Werten. Übertragen auf den Investitionsfall lässt sich daraus schließen, dass es unwahrscheinlicher ist, das Risiko durch eine zusätzliche Investition zu erhöhen. Wenn es jedoch zu einer Investition in eine Biogasanlage kommt, die das Risiko des Portfolios erhöht, kann die Steigerung des Risikos verhältnismäßig hoch ausfallen.

Ausgehend von einer Einzelanlage kann das Risiko im besten Fall um -13,20%-Punkte reduziert werden, während es im schlechtesten Fall um 11,62%-Punkte erhöht werden kann. Besteht das Portfolio bereits aus fünf Biogasanlagen liegt die Risikoreduktion im Mittelwert bei -0,24%. Im Minimum kann eine Risikoreduktion von -2,12%-Punkten erreicht werden. Die maximale Steigerung des Risikos liegt in diesem Fall bei 3,26%-Punkten. Bei einer

Portfoliogröße von zehn Biogasanlagen liegt die Risikoreduktion durch eine zusätzliche Investition im Mittel bei $-0,08\%$ -Punkten. Das Minimum liegt bei $-0,86\%$ -Punkten, während das Maximum bei $1,61\%$ -Punkten liegt. Bei einer Portfoliogröße von 20 wird das Risiko im Mittel um $-0,027\%$ -Punkte reduziert. Im besten Fall kann das Risiko nur um $-0,35\%$ -Punkte reduziert und im schlechtesten Fall um $0,66\%$ -Punkte erhöht werden.

Die Änderung des Portfoliorisikos beruht nicht nur auf den gewichteten Risiken der Einzelanlagen, sondern auch auf deren Kovarianz untereinander. Unter Verwendung der Varianz als Risikomaß, statt der Standardabweichung, lassen sich Aussagen dazu treffen welcher Teil der Risikoänderung auf die Gewichtung der Einzelrisiken zurückzuführen ist und welcher Teil durch die Kovarianz verursacht wird. Außerdem ist zu erkennen in welche Richtung der Effekt wirkt, also ob das Portfoliorisiko erhöht oder reduziert wird. Die roten Violin-Plots in Abbildung 60 zeigen die Dichteschätzung der gesamten Varianzänderung. In grün ist dargestellt welcher Anteil dieser Änderung auf die gewichteten Risiken der Einzelanlagen zurückzuführen ist und in blau der Anteil, der auf die Kovarianz zurückzuführen ist. Die dazugehörige deskriptive Statistik ist in Tabelle 63 dargestellt.

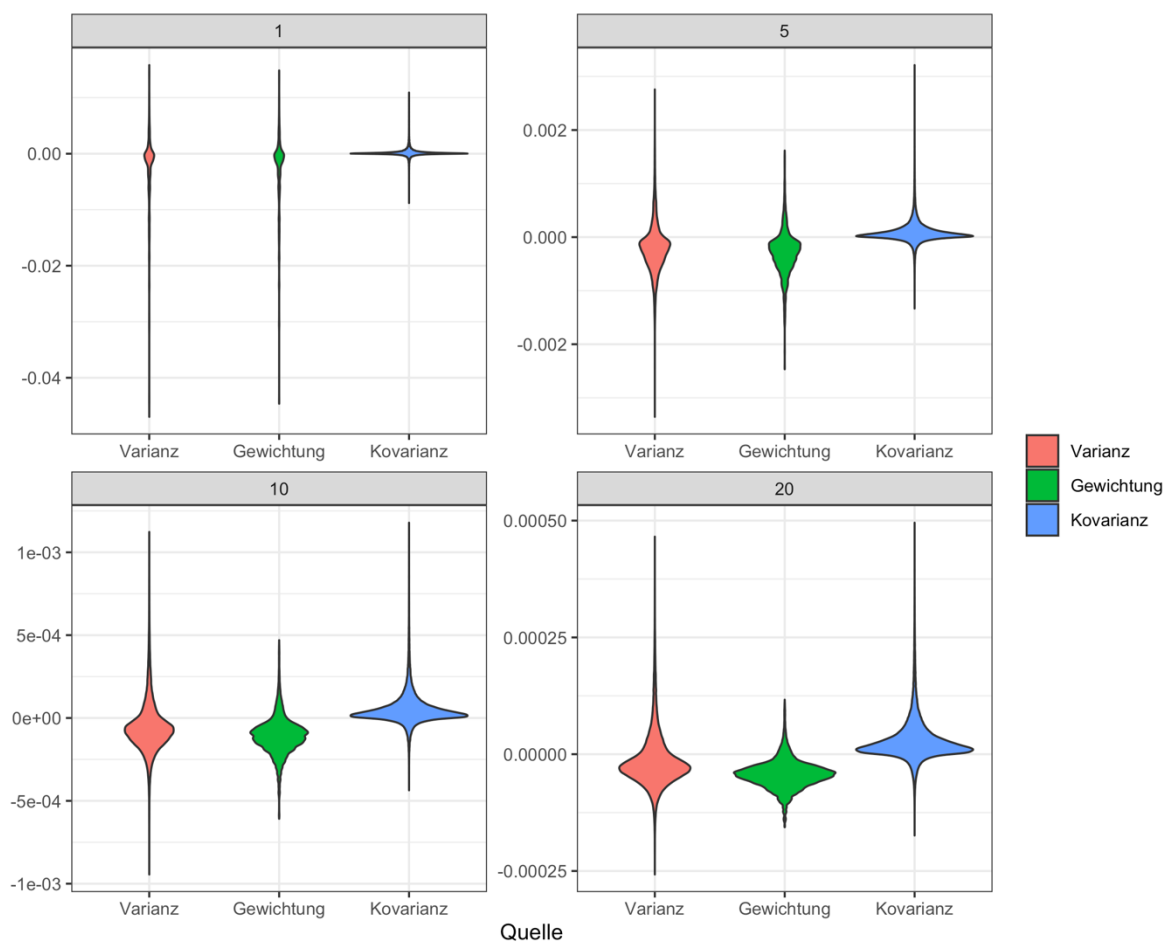


Abbildung 60: Dichteschätzung der Varianzänderung bei verschiedenen Portfoliogrößen
Quelle: Eigene Darstellung

Über alle Portfoliogrößen ist zu erkennen, dass sich ein Großteil der Verteilungsmasse der gesamten Varianzänderung im negativen Bereich befindet. Es kommt demnach häufiger zu einer Risikominderung durch eine zusätzliche Investition. Insgesamt streut die Varianzänderung sehr breit. Im Fall der Einzelanlagen ist die Spannweite der gesamten Varianzänderung vergleichbar mit der Spannweite der Änderungen durch die Gewichtung. Die Spannweite der gesamten Varianzänderung beträgt 0,0628 und die der Änderung durch die Gewichtung 0,0595. Bei der Änderung durch die Kovarianz beträgt die Spannweite dagegen nur 0,0197. Die Extremwerte der Varianzänderung kommen demnach durch die Gewichtung zu Stande. Mit zunehmender Portfoliogröße nimmt die Spannweite der Änderung durch die Gewichtung ab und die Spannweite der Änderung durch die Kovarianz nimmt zu. Bei der Änderung durch die Kovarianz nimmt vor allem die Streuung nach oben zu.

Die Violinplots der Risikoänderung durch die Gewichtung ähneln in Form und Lage denen der gesamten Varianzänderung. Genau wie der Großteil der Verteilungsmasse der gesamten Varianzänderung liegt ein Großteil der Verteilungsmasse der Änderung durch die Gewichtung im negativen Bereich. Die Kovarianz dagegen wirkt entgegengesetzt. Bei dem durch die Kovarianz verursachten Anteil der Risikoänderung liegt ein Großteil der Verteilungsmasse im positiven Bereich und führt demnach zu einer Risikosteigerung. Dieser Effekt gewinnt mit zunehmender Portfoliogröße an Bedeutung, während die Bedeutung der Gewichtung abnimmt. Für die Portfoliogrößen eins, fünf und zehn ist im Mittel der Effekt durch die Gewichtung stärker als der Effekt durch die Kovarianz. Erst ab einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen überwiegt der Effekt durch die Kovarianz. Das hat zur Folge, dass im Gegensatz zu den Portfoliogrößen fünf und zehn das 75%-Quantil im positiven Bereich liegt. Demnach kommt es bei einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen in mehr als 25% der Fälle zu einer Risikosteigerung. Daraus lässt sich schließen, dass die Wahrscheinlichkeit einer Risikoreduzierung durch eine zusätzliche zufällige Investition mit zunehmender Portfoliogröße abnimmt. Dass das 75%-Quantil ausgehend von den Einzelanlagen ebenfalls im positiven Bereich liegt, ist vermutlich mit der hohen Streuung der Änderungsraten zu begründen.

Tabelle 63: Deskriptive Statistik der Varianzänderung bei verschiedenen Portfoliogrößen

		Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max
1	Δ Varianz	-3,00E-03	7,01E-03	-4,70E-02	-4,17E-03	-9,80E-04	2,42E-04	1,58E-02
	Δ durch Gewichtung	-3,17E-03	7,05E-03	-4,46E-02	-4,29E-03	-1,06E-03	1,55E-04	1,49E-02
	Δ durch Kovarianz	1,62E-04	6,77E-04	-8,81E-03	-4,04E-05	6,70E-05	2,65E-04	1,09E-02
5	Δ Varianz	-2,06E-04	4,53E-04	-3,36E-03	-4,47E-04	-2,09E-04	-1,86E-05	2,76E-03
	Δ durch Gewichtung	-2,94E-04	4,01E-04	-2,47E-03	-5,05E-04	-2,68E-04	-9,03E-05	1,62E-03
	Δ durch Kovarianz	8,77E-05	1,95E-04	-1,33E-03	2,15E-06	5,06E-05	1,35E-04	3,21E-03
10	Δ Varianz	-5,43E-05	1,52E-04	-9,44E-04	-1,38E-04	-7,24E-05	-1,42E-06	1,12E-03
	Δ durch Gewichtung	-1,07E-04	1,10E-04	-6,08E-04	-1,66E-04	-1,07E-04	-5,31E-05	4,70E-04
	Δ durch Kovarianz	5,25E-05	9,32E-05	-4,36E-04	6,75E-06	3,23E-05	7,54E-05	1,18E-03
20	Δ Varianz	-1,40E-05	5,82E-05	-2,57E-04	-4,63E-05	-2,51E-05	4,21E-06	4,66E-04
	Δ durch Gewichtung	-4,33E-05	3,02E-05	-1,56E-04	-6,02E-05	-4,35E-05	-2,81E-05	1,17E-04
	Δ durch Kovarianz	2,93E-05	4,45E-05	-1,74E-04	5,81E-06	1,86E-05	4,07E-05	4,95E-04

Quelle: Eigene Berechnungen

4.2.2.2 Beitrag von Einzelanlagen auf den Value at Risk eines Portfolios

Analog zur Standardabweichung zeigt Abbildung 61 den durchschnittlichen Value at Risk von naiv diversifizierten Biogas-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße. Erwartungsgemäß sinkt auch der Value at Risk mit zunehmender Portfoliogröße. Betrachtet man die Änderung des Value at Risk, ist ebenfalls zu erkennen, dass diese bereits ab einer Portfoliogröße von ungefähr 15 nur noch minimal ist. Die Investition in eine zusätzliche Biogasanlage ist dann nur noch mit einer sehr geringen Reduktion des Value at Risk verbunden.

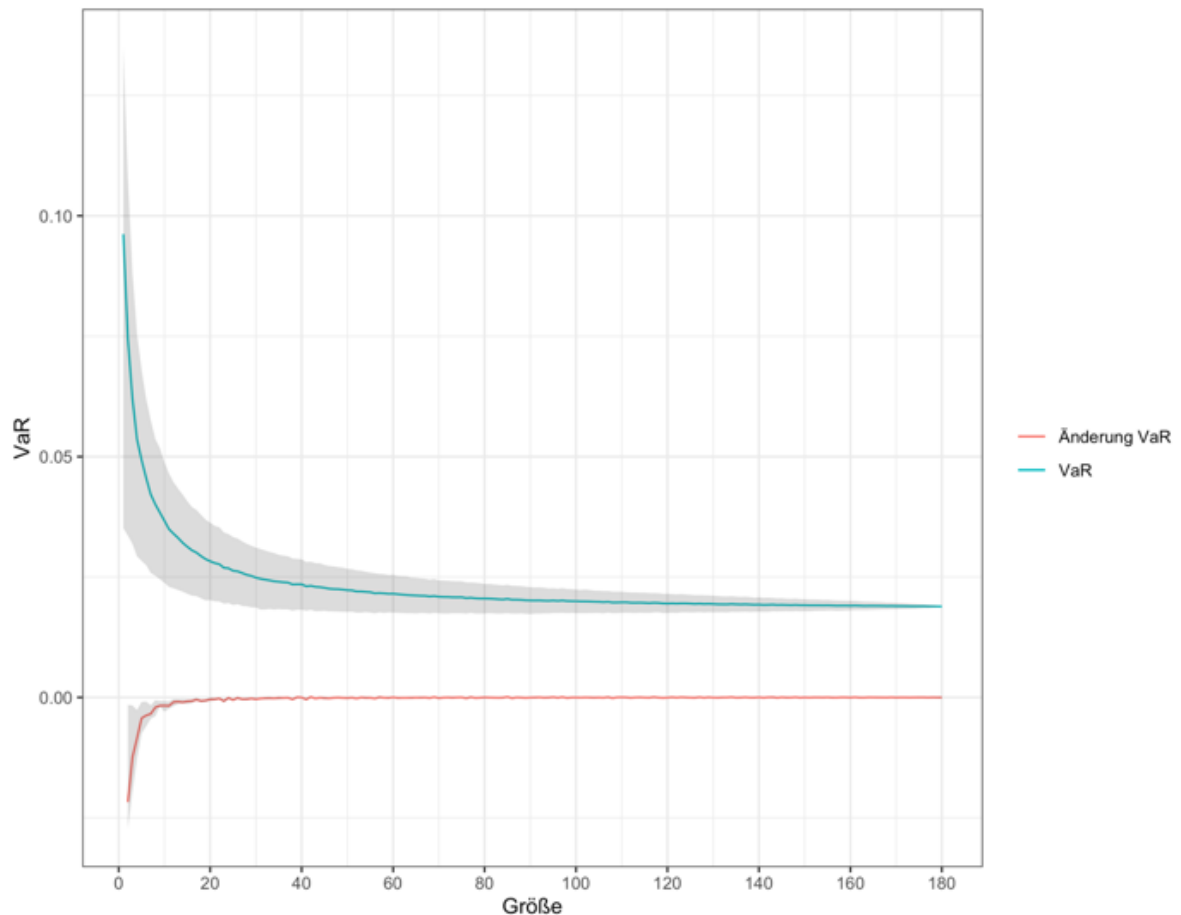


Abbildung 61: Value at Risk naiv diversifizierter Biogasanlagen-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße

Quelle: Eigene Darstellung

Auch bei der Untersuchung des Beitrags von Einzelanlagen auf die Änderung des Value at Risk als Risikomaß eines Portfolios wird zunächst die Ausgangssituation beschrieben. Die deskriptive Statistik der Bestandsportfolios ist Tabelle 64 zu entnehmen.

Tabelle 64: Deskriptive Statistik des Value at Risk der Bestandsportfolios (Ausgangssituation)

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Risiko (VaR) Bestandsportfolios (1)	0,0977	0,0890	-0,0728	0,0370	0,0680	0,1352	0,4033	180
Risiko (VaR) Bestandsportfolios (5)	0,0507	0,0297	-0,0231	0,0291	0,0504	0,0704	0,1619	1.000
Risiko (VaR) Bestandsportfolios (10)	0,0369	0,0186	-0,0186	0,0241	0,0371	0,0492	0,1077	1.000
Risiko (VaR) Bestandsportfolios (20)	0,0284	0,0119	-0,0087	0,0202	0,0284	0,0363	0,0629	1.000

Quelle: Eigene Berechnungen

Erwartungsgemäß zeigt hier die deskriptive Statistik ebenfalls, dass der Mittelwert des Value at Risk der Bestandsportfolios mit zunehmender Portfoliogröße sinkt. Bei den Einzelanlagen liegt der Value at Risk im Mittel bei 9,77%. In 95% der Fälle wird im Mittel ein Verlust von 9,77% nicht überschritten. Bei einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen liegt dieser Wert im Mittel bei nur 2,84%. Ebenfalls verringert sich die Standardabweichung des Value at Risk mit zunehmender Portfoliogröße. Der Value at Risk streut weniger und die Bestandsportfolios werden sich in Bezug auf den Value at Risk mit zunehmender Portfoliogröße ähnlicher. So liegen 50% der Werte im Bereich zwischen 2,02% und 3,63% bei einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen, während bei den Einzelanlagen 50% der Werte im Bereich von 3,70% und 13,52% liegen. Für alle Portfoliogrößen zeigt das 25%-Quantil einen positiven Wert. In über 75% der Fälle ist der Value at Risk mit einem Verlust bzw. einer negativen Rendite verbunden. Lediglich die Minimalwerte sind negativ. Demnach wird auch in den schlechtesten 5% eine positive Rendite erzielt. Das geringste Risiko ist mit einem Value at Risk in Höhe von -7,28% verbunden und kann nur mit einer Einzelanlage erzielt werden. Das optimierte Portfolio in Kapitel 4.2.1.1.2 weist mit einem Wert von -8,68% einen geringeren Value at Risk auf als die Einzelanlage. Durch naive Diversifikation wird dieser Wert nicht erreicht und der Value at Risk der risikominimalen Einzelanlage nicht unterschritten. Auch der maximale Value at Risk in Höhe von 40,33% wird mit einer Einzelanlage erzielt. Insgesamt liegen die Minimalwerte näher beieinander als die Maximalwerte.

Wenn, ausgehend von den beschriebenen Bestandsportfolios, in eine weitere Biogasanlage investiert wird, entstehen neue Zufallsportfolios. Die Eigenschaften des Value at Risk dieser Portfolios sind durch die Statistik in Tabelle 65 beschrieben.

Tabelle 65: Deskriptive Statistik des Value at Risk der Zufallsportfolios nach der zusätzlichen Investition

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Risiko (VaR) Simulation (2)	0,0736	0,0547	-0,0834	0,0330	0,0631	0,1065	0,3277	32220
Risiko (VaR) Simulation (6)	0,0466	0,0262	-0,0428	0,0281	0,0458	0,0639	0,1747	175000
Risiko (VaR) Simulation (11)	0,0355	0,0175	-0,0260	0,0233	0,0353	0,0471	0,1174	170000
Risiko (VaR) Simulation (21)	0,0279	0,0115	-0,0139	0,0200	0,0279	0,0358	0,0685	160000

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Mittelwerte des Value at Risk der Portfolios sind nach der Simulation etwas geringer als die Mittelwerte der Bestandsportfolios. Die Streuung um diesen Mittelwert nimmt durch die zusätzliche Investition erwartungsgemäß ab. Bei den Einzelanlagen nimmt die Spannweite ab, während sie ab einer Portfoliogröße von fünf Biogasanlagen zunimmt. Außer bei den Einzelanlagen steigert die zusätzliche Investition den Maximalwert des Value at Risk. Auch der Median des Value at Risk ist nach der Simulation etwas geringer als der Median der Bestandsportfolios. Die zusätzliche Investition, ausgehend von den Einzelanlagen, führt im Mittel dazu, dass der Value at Risk um 2,41%-Punkte sinkt. Ausgehend von den Bestandsportfolios mit

fünf Biogasanlagen sind es nur 0,41%-Punkte, von zehn auf elf noch 0,14%-Punkte und von 20 auf 21 noch 0,05%-Punkte.

Im Folgenden wird die Änderung des Value at Risk untersucht, wenn, ausgehend von den beschriebenen Bestandsportfolios, in eine weitere Biogasanlage investiert wird. Die Histogramme in Abbildung 62 zeigen die Änderung des Value at Risk bei verschiedenen Portfolio-Größen.

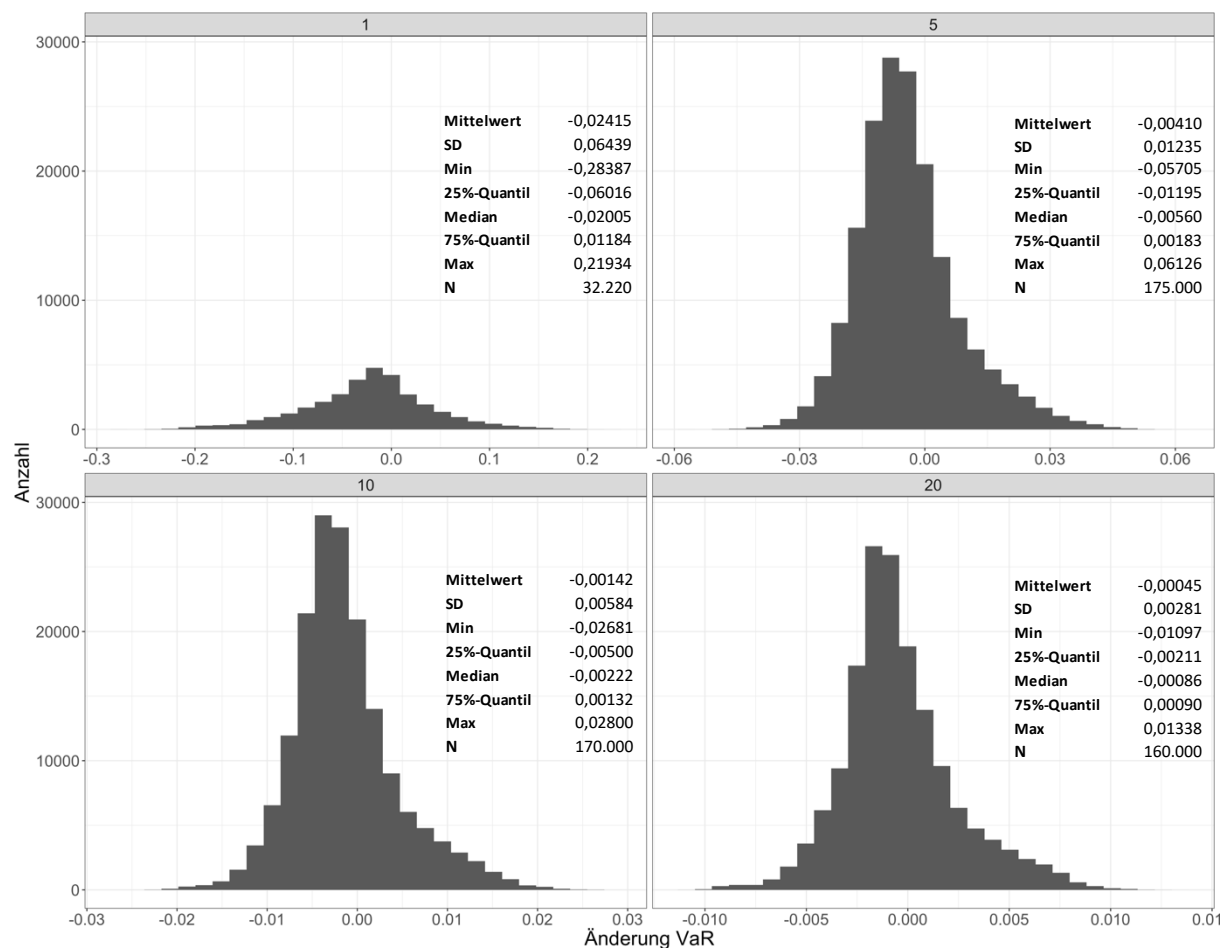


Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der Risikoänderung (VaR) durch die zusätzliche Investition bei unterschiedlichen Portfolio-Größen
Quelle: Eigene Darstellung

Der Mittelwert der Änderung des Value at Risk ist bei allen Portfolio-Größen negativ. Das heißt im Mittel konnte das Risiko durch eine zusätzliche Investition reduziert werden. Der Median ist bei allen Portfolio-Größen negativ, während das 75%-Quantil bei allen Portfolio-Größen positiv ist. Demnach wird das Risiko in mehr als 50% aber weniger als 75% der Fälle reduziert. Die Häufigkeitsverteilung der Änderung des Value at Risk ist nahezu symmetrisch, eventuell ganz leicht rechtsschief. Der größere Teil der Verteilungsmasse liegt unter null.

Ausgehend von einer Einzelanlage kann der Value at Risk im besten Fall um -28,39% reduziert werden, während er im schlechtesten Fall um 21,93% erhöht werden kann. Besteht das Portfolio bereits aus fünf Biogasanlagen liegt die Änderung des Value at Risk im Mittelwert

bei -0,41%. Im Minimum kann eine Risikoreduktion von -5,71% erreicht werden. Die maximale Steigerung des Value at Risk liegt in diesem Fall bei 6,13%. Bei einer Portfoliogröße von zehn Biogasanlagen liegt die Reduktion des Value at Risk durch eine zusätzliche Investition im Mittel bei -0,14%. Das Minimum liegt bei -2,68%, während das Maximum bei 2,80% liegt. Bei einer Portfoliogröße von 20 wird der Value at Risk im Mittel um -0,05% reduziert. Im besten Fall kann der Value at Risk um -1,10% reduziert und im schlechtesten Fall um 1,34% erhöht werden.

Die Änderung des Value at Risk sind auf Änderungen durch die Rendite und Änderungen durch die Standardabweichung zurückzuführen. Die roten Violinplots in Abbildung 63 zeigen die Dichteverteilung der gesamten Änderungen des Value at Risk. In grün ist dargestellt welcher Anteil dieser Änderung auf die Renditen zurückzuführen ist und in blau der Anteil, der auf die Standardabweichung zurückzuführen ist.

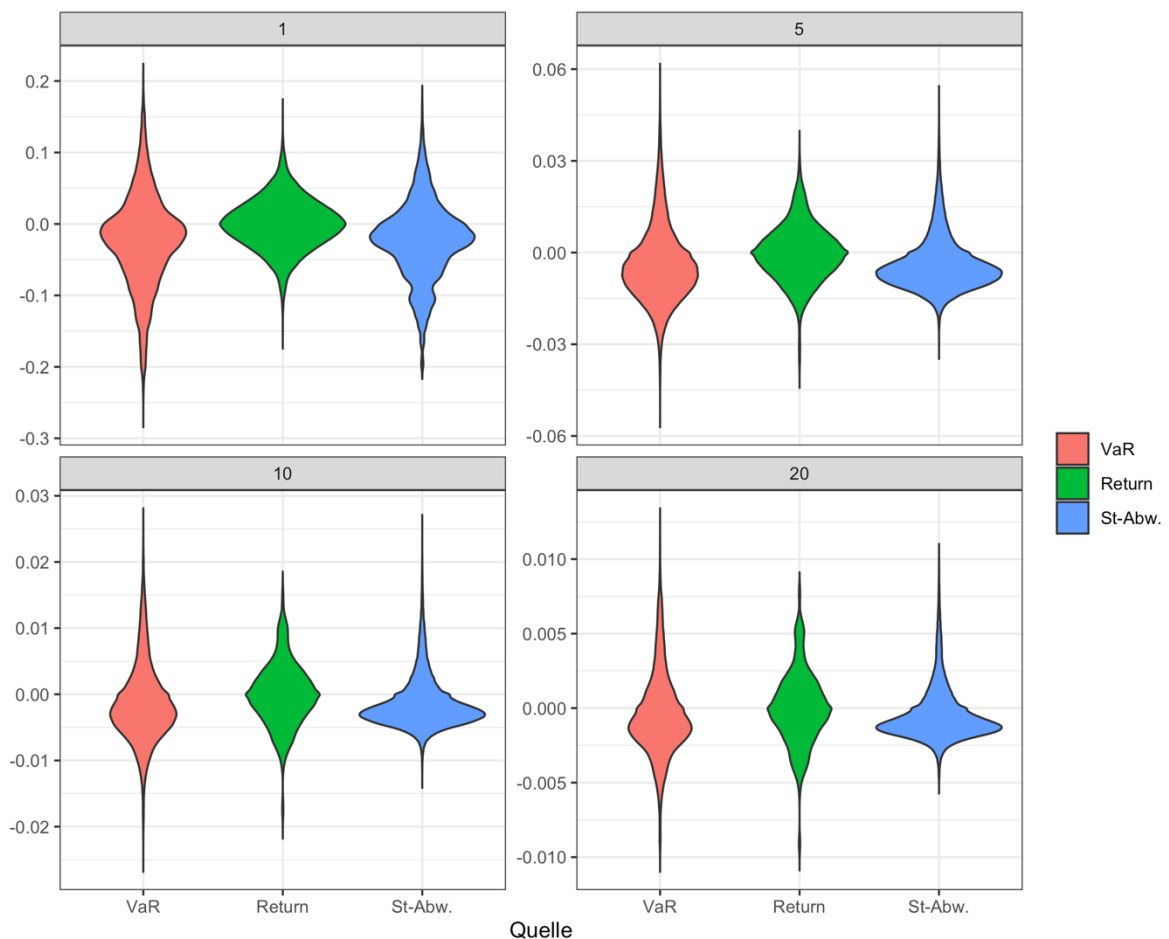


Abbildung 63: Dichteverteilung der Gesamtänderungen des Value at Risk bei unterschiedlichen Portfoliogrößen
Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 66 enthält die deskriptive Statistik zu den Violinplots in Abbildung 63. Der Median der Änderung des Value at Risk ist für alle Portfoliogrößen negativ. Demnach befindet sich ein Großteil der Verteilungsmasse der Änderungen im negativen Bereich, was auch an den

Violinplots deutlich zu erkennen ist. Es kommt demnach häufiger zu einer Reduzierung des Value at Risk durch eine zusätzliche Investition. Die Änderung durch die Rendite entspricht erwartungsgemäß einer fast symmetrischen Verteilung. Mittelwert und Median liegen für alle Portfoliogrößen nahezu bei null. Die im Mittel negative Änderung des Value at Risk kommt durch die Standardabweichung der Portfolios und Einzelanlagen zustande. Ein Großteil der Verteilungsmasse bei den Änderungen durch die Standardabweichung liegt im negativen Bereich.

Tabelle 66: Deskriptive Statistik der Gesamtänderungen des Value at Risks bei unterschiedlichen Portfoliogrößen

		Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max
1	Δ Value at Risk	-0,0234	0,0647	-0,2846	-0,0595	-0,0190	0,0124	0,2243
	Δ Rendite	0,0000	0,0353	-0,1747	-0,0223	0,0000	0,0223	0,1747
	Δ Risiko (SD)	-0,0234	0,0537	-0,2171	-0,0530	-0,0203	0,0063	0,1934
5	Δ Value at Risk	-0,0040	0,0124	-0,0572	-0,0119	-0,0055	0,0018	0,0618
	Δ Rendite	-0,0002	0,0092	-0,0443	-0,0060	-0,0004	0,0052	0,0398
	Δ Risiko (SD)	-0,0038	0,0087	-0,0348	-0,0094	-0,0056	-0,0004	0,0545
10	Δ Value at Risk	-0,0014	0,0058	-0,0268	-0,0050	-0,0022	0,0013	0,0281
	Δ Rendite	-0,0001	0,0048	-0,0218	-0,0030	-0,0001	0,0027	0,0186
	Δ Risiko (SD)	-0,0013	0,0039	-0,0141	-0,0038	-0,0023	0,0000	0,0271
20	Δ Value at Risk	-0,0004	0,0028	-0,0110	-0,0021	-0,0008	0,0009	0,0134
	Δ Rendite	0,0000	0,0024	-0,0109	-0,0015	-0,0001	0,0014	0,0091
	Δ Risiko (SD)	-0,0004	0,0018	-0,0057	-0,0015	-0,0009	0,0001	0,0110

Quelle: Eigene Berechnungen

4.2.2.3 Beitrag von Einzelanlagen auf den Conditional Value at Risk eines Portfolios

Analog zur Standardabweichung und dem Value at Risk zeigt Abbildung 64 den durchschnittlichen Conditional Value at Risk von naiv diversifizierten Biogas-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße. Erwartungsgemäß sinkt, wie die Standardabweichung und der Value at Risk, auch der Conditional Value at Risk mit zunehmender Portfoliogröße. Betrachtet man die Änderung des Conditional Value at Risk, ist ebenfalls zu erkennen, dass diese bereits ab einer Portfoliogröße von ungefähr 15 nur noch minimal ist. Die Investition in eine zusätzliche Biogasanlage ist dann nur noch mit einer sehr geringen Reduktion des Conditional Value at Risk verbunden.

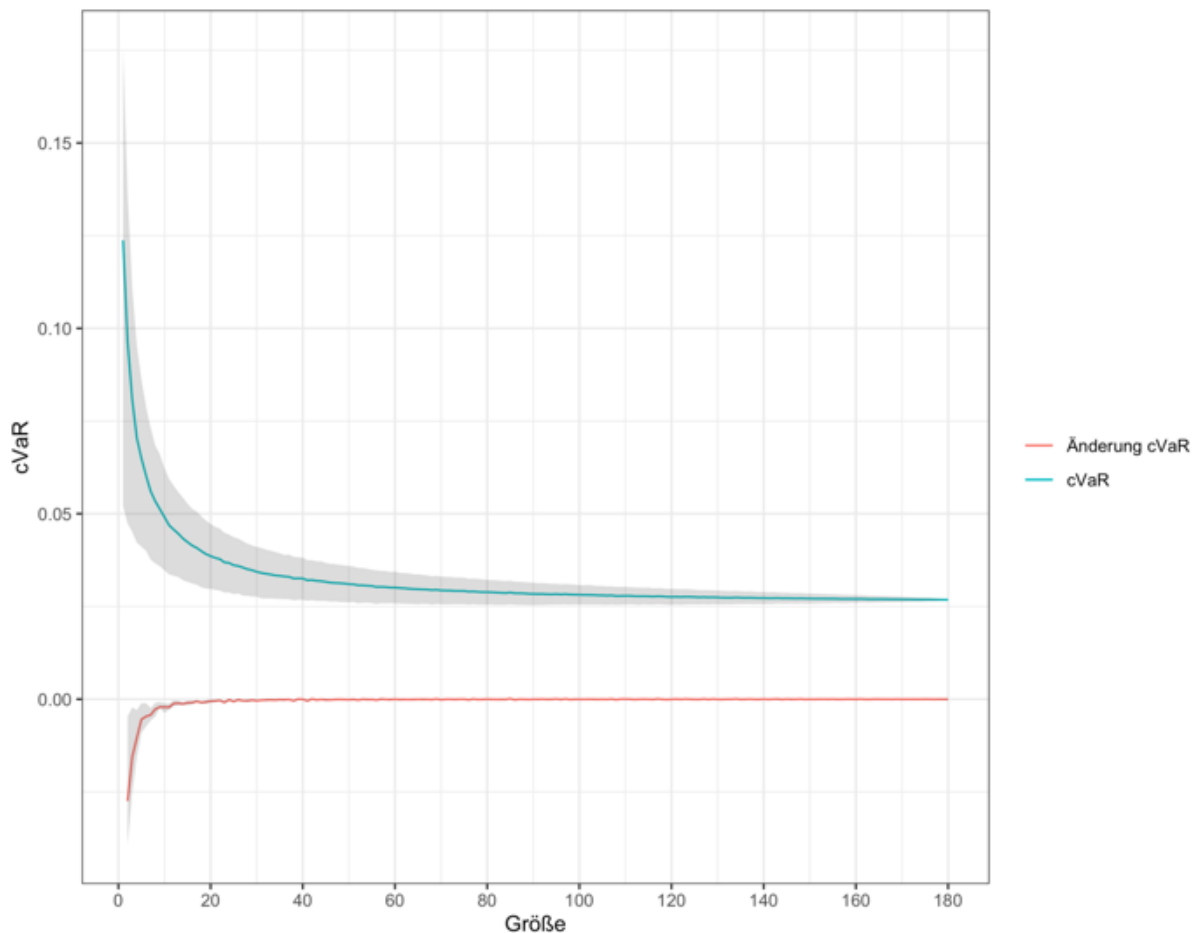


Abbildung 64: Conditional Value at Risk naiv diversifizierter Biogasanlagen-Portfolios in Abhängigkeit von der Portfoliogröße
Quelle: Eigene Darstellung

Auch bei der Untersuchung des Beitrags von Einzelanlagen auf den Conditional Value at Risk als Risikomaß eines Portfolios wird zunächst die Ausgangssituation durch die deskriptive Statistik der Bestandsportfolios dargestellt. Diese ist der Tabelle 67 zu entnehmen.

Tabelle 67: Deskriptive Statistik des Conditional Value at Risk der Bestandsportfolios (Ausgangssituation)

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Risiko (CVaR) Bestandsportfolios (1)	0,1256	0,1048	-0,0563	0,0540	0,0871	0,1761	0,4825	180
Risiko (CVaR) Bestandsportfolios (5)	0,0664	0,0331	-0,0152	0,0424	0,0655	0,0890	0,1897	1.000
Risiko (CVaR) Bestandsportfolios (10)	0,0492	0,0204	-0,0096	0,0349	0,0491	0,0632	0,1252	1.000
Risiko (CVaR) Bestandsportfolios (20)	0,0387	0,0129	0,0001	0,0300	0,0385	0,0473	0,0753	1.000

Quelle: Eigene Berechnungen

Erwartungsgemäß sinkt der Mittelwert des Conditional Value at Risk der Bestandsportfolios mit zunehmender Portfoliogröße. Bei den Einzelanlagen liegt der Conditional Value at Risk im Mittel bei 12,56%. Wenn der Value at Risk überschritten wird, ist ein Verlust von 12,56% zu erwarten. Bei einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen liegt der Mittelwert nur bei 3,87%. Ebenfalls verringert sich die Standardabweichung des Conditional Value at Risk mit zunehmender Portfoliogröße. Der Conditional Value at Risk streut weniger und die

Bestandsportfolios werden sich in Bezug auf den Value at Risk mit zunehmender Portfoliogröße ähnlicher. So liegen 50% der Werte im Bereich zwischen 3,00% und 4,73% bei einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen, während bei den Einzelanlagen 50% der Werte im Bereich von 5,40% und 17,61% liegen. Für alle Portfoliogrößen zeigt das 25%-Quantil einen positiven Wert. Demnach ist der Conditional Value at Risk in über 75% der Fälle mit einem Verlust bzw. einer negativen Rendite verbunden. Die Minimalwerte für die Portfoliogrößen eins, fünf und zehn sind negativ. Das heißt, auch wenn der Value at Risk überschritten wird, wird kein Verlust erwartet. Bei einer Portfoliogröße von 20 Biogasanlagen ist der Minimalwert positiv. Demnach ist ein Verlust von 0,01% zu erwarten. Außerdem ist zu erkennen, dass der geringste Conditional Value at Risk in Höhe von -5,63% mit einer Einzelanlage erzielt werden kann. Das optimierte Portfolio in Kap 4.2.1.1.3 dagegen hat einen Conditional Value at Risk von -7,73%. Das optimierte risikominimale Portfolio weist demnach einen geringeren Conditional Value at Risk auf als die risikominimale Einzelanlage. Durch naive Diversifikation wird dieser Wert jedoch nicht erreicht und der Conditional Value at Risk der risikominimalen Einzelanlage nicht unterschritten. Auch der maximale Conditional Value at Risk in Höhe von 48,25% ist mit einer Einzelanlage verbunden. Insgesamt liegen die Minimalwerte näher beieinander als die Maximalwerte.

Wenn ausgehend von den beschriebenen Bestandsportfolios in eine weitere Biogasanlage investiert wird, entstehen neue Portfolios. Die Eigenschaften des Conditional Value at Risk dieser Portfolios sind durch die Statistik in Tabelle 68 beschrieben.

Tabelle 68: Deskriptive Statistik des Conditional Value at Risk der Zufallsportfolios nach der zusätzlichen Investition

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Risiko (CVaR) Simulation (2)	0,0953	0,0633	-0,0661	0,0468	0,0828	0,1345	0,3800	32220
Risiko (CVaR) Simulation (6)	0,0613	0,0291	-0,0338	0,0406	0,0603	0,0807	0,2038	175000
Risiko (CVaR) Simulation (11)	0,0475	0,0191	-0,0177	0,0340	0,0472	0,0603	0,1349	170000
Risiko (CVaR) Simulation (21)	0,0381	0,0125	-0,0057	0,0294	0,0380	0,0468	0,0811	160000

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Mittelwerte des Conditional Value at Risk der Zufallsportfolios sind nach der Simulation etwas geringer als die Mittelwerte der Bestandsportfolios. Die Streuung um diesen Mittelwert nimmt durch die zusätzliche Investition erwartungsgemäß ab. Bei den Einzelanlagen nimmt die Spannweite ab, während sie ab einer Portfoliogröße von fünf Biogasanlagen zunimmt. Ab einer Portfoliogröße von fünf Biogasanlagen steigert die zusätzliche Investition den Maximalwert des Conditional Value at Risk. Auch der Median des Conditional Value at Risk ist nach der Simulation etwas geringer als der Median der Bestandsportfolios. Die zusätzliche Investition ausgehend von den Einzelanlagen führt im Mittel dazu, dass der Conditional Value at Risk um 3,03%-Punkte sinkt. Ausgehend von den Bestandsportfolios mit fünf Biogasanlagen sind

es nur 0,51%-Punkte, von zehn auf elf noch 0,17%-Punkte und von 20 auf 21 noch 0,06%-Punkte.

Im Folgenden wird die Änderung des Conditional Value at Risk untersucht, wenn ausgehend von den beschriebenen Bestandsportfolios in eine weitere Biogasanlage investiert wird. Die Histogramme in Tabelle 65 zeigen die Änderung des Conditional Value at Risk bei verschiedenen Portfoliogrößen.

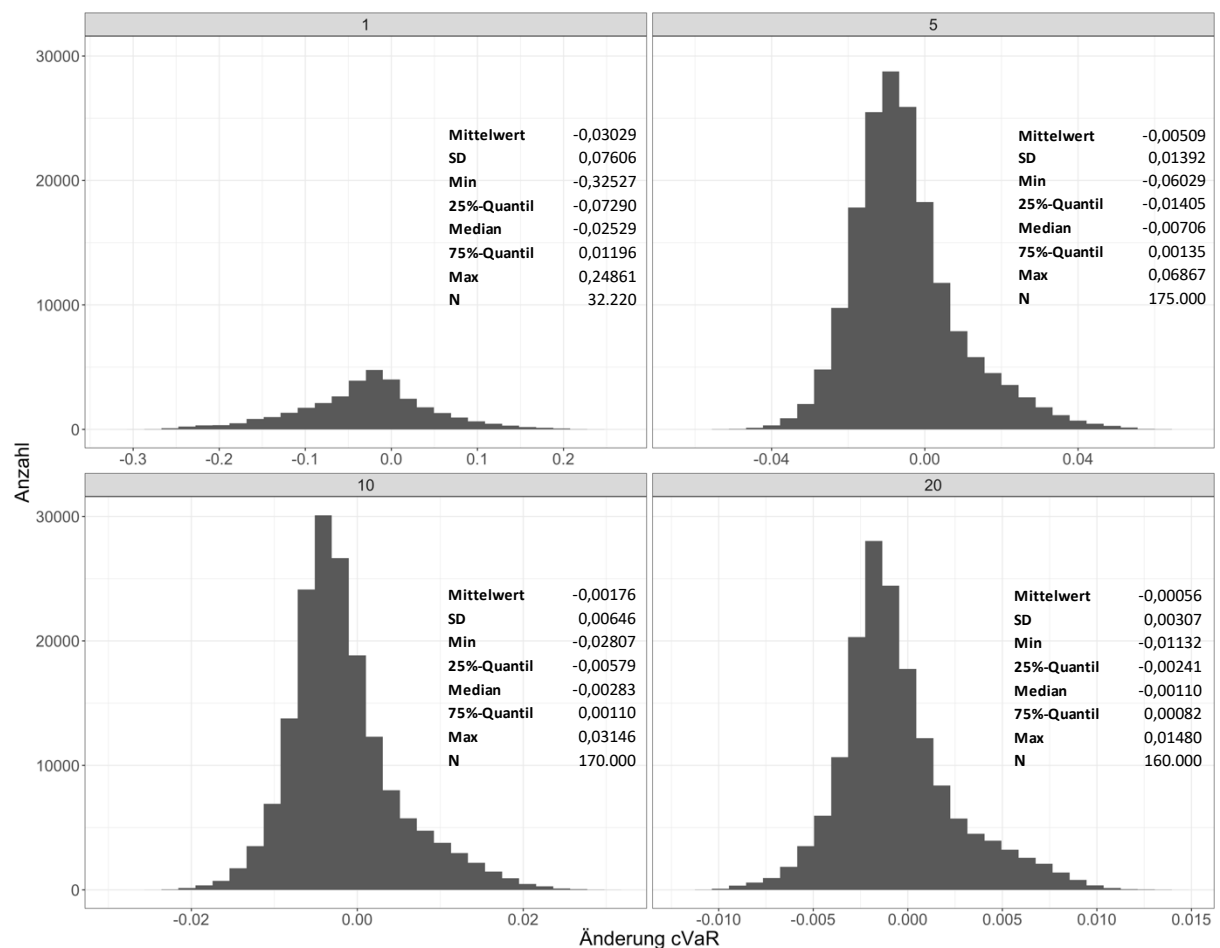


Abbildung 65: Häufigkeitsverteilung der Risikoänderung (cVaR) durch die zusätzliche Investition bei unterschiedlichen Portfoliogrößen
Quelle: Eigene Darstellung

Der Mittelwert der Änderung des Conditional Value at Risk ist bei allen Portfoliogrößen negativ. Das heißt im Mittel konnte das Risiko durch eine zusätzliche Investition reduziert werden. Der Median ist bei allen Portfoliogrößen negativ, während das 75%-Quantil bei allen Portfoliogrößen positiv ist. Demnach wird das Risiko in mehr als 50% aber weniger als 75% der Fälle reduziert. Die Häufigkeitsverteilung der Änderung des Conditional Value at Risk ist nahezu symmetrisch, eventuell ganz leicht rechtsschief. Der größere Teil der Verteilungsmasse liegt unter null.

Ausgehend von einer Einzelanlage kann der Conditional Value at Risk im besten Fall um -32,53% reduziert werden, während es im schlechtesten Fall um 24,86% erhöht werden

kann. Besteht das Portfolio bereits aus fünf Biogasanlagen liegt die Änderung des Conditional Value at Risk im Mittelwert bei -0,51%. Im Minimum kann eine Risikoreduktion von -6,03% erreicht werden. Die maximale Steigerung des Conditional Value at Risk liegt in diesem Fall bei 6,87%. Bei einer Portfoliogröße von zehn Biogasanlagen liegt die Reduktion des Conditional Value at Risk durch eine zusätzliche Investition im Mittel bei -0,18%. Das Minimum liegt bei -2,81%, während das Maximum bei 3,15% liegt. Bei einer Portfoliogröße von 20 wird der Conditional Value at Risk im Mittel um -0,06% reduziert. Im besten Fall kann der Value at Risk um -1,13% reduziert und im schlechtesten Fall um 1,48% erhöht werden.

Die Änderung des Conditional Value at Risk sind auf Änderungen durch die Rendite und Änderungen durch die Standardabweichung zurückzuführen. Die roten Violinplots in Abbildung 66 zeigen die Dichteverteilung der gesamten Änderungen des Conditional Value at Risk. In grün ist dargestellt welcher Anteil dieser Änderung auf die Renditen zurückzuführen ist und in blau der Anteil, der auf die Standardabweichung zurückzuführen ist.

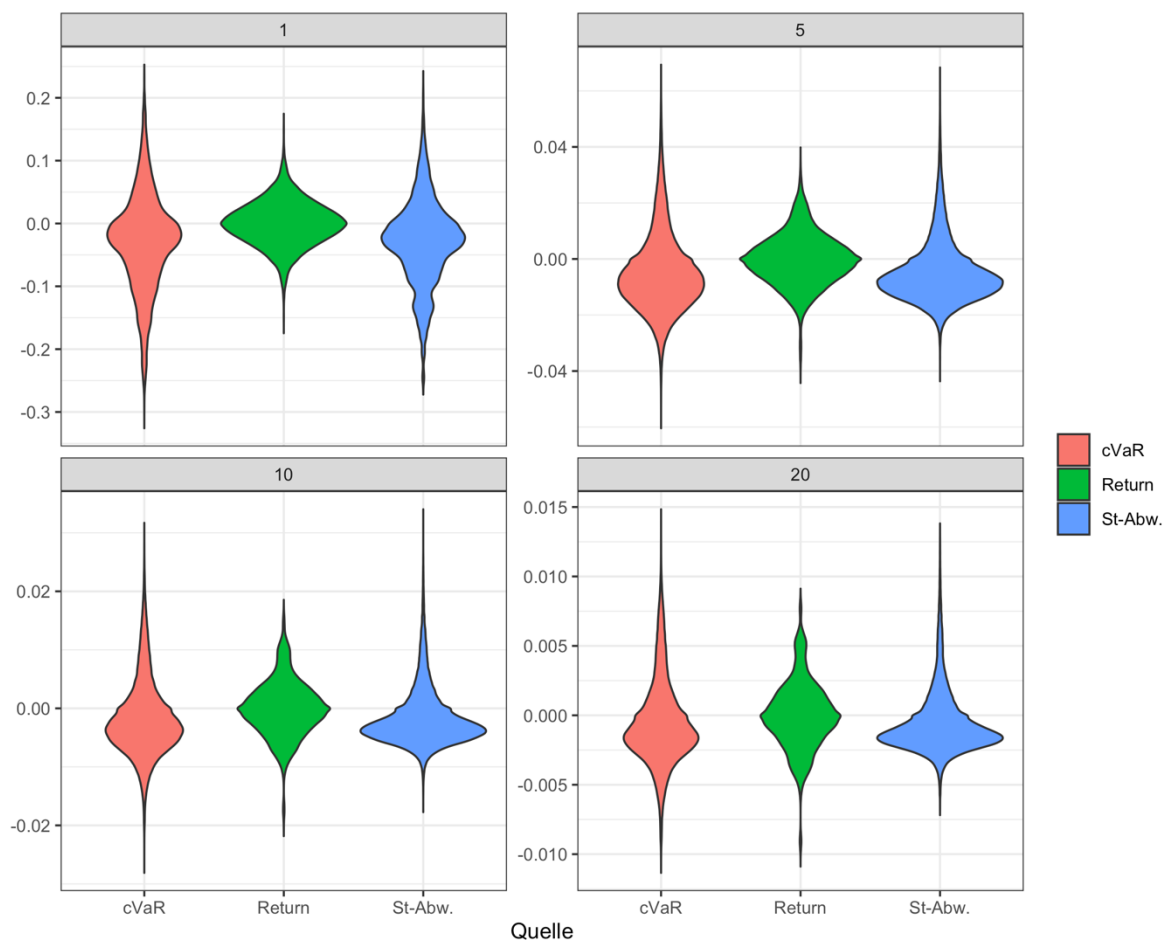


Abbildung 66: Dichteverteilung der Gesamtänderungen des Conditional Value at Risk bei unterschiedlichen Portfoliogrößen

Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 69 enthält die deskriptive Statistik zu den Violinplots in Abbildung 66. Der Median der Änderung des Conditional Value at Risk ist für alle Portfoliogrößen negativ. Demnach befindet

sich ein Großteil der Verteilungsmasse der Änderungen im negativen Bereich, was auch an den Violinplots deutlich zu erkennen ist. Es kommt demnach häufiger zu einer Reduzierung des Conditional Value at Risk durch eine zusätzliche Investition.

Wie beim Value at Risk entspricht die Änderung durch die Rendite erwartungsgemäß einer fast symmetrischen Verteilung. Mittelwert und Median sind fast identisch und liegen für alle Portfoliogrößen nahezu bei null.

Die im Mittel negative Änderung des Conditional Value at Risk kommt durch die Standardabweichung der Portfolios und der Einzelanlagen zustande. Ein Großteil der Verteilungsmasse bei den Änderungen durch die Standardabweichung liegt im negativen Bereich.

Tabelle 69: Deskriptive Statistik der Gesamtänderungen des Conditional Value at Risk bei unterschiedlichen Portfoliogrößen

		Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max
1	Δ Cond. Value at Risk	-0,0293	0,0765	-0,3259	-0,0722	-0,0241	0,0126	0,2527
	Δ Rendite	0,0000	0,0353	-0,1747	-0,0223	0,0000	0,0223	0,1747
	Δ Risiko (SD)	-0,0293	0,0673	-0,2723	-0,0665	-0,0255	0,0079	0,2426
5	Δ Cond. Value at Risk	-0,0050	0,0140	-0,0604	-0,0140	-0,0069	0,0014	0,0694
	Δ Rendite	-0,0002	0,0092	-0,0443	-0,0060	-0,0004	0,0052	0,0398
	Δ Risiko (SD)	-0,0048	0,0109	-0,0437	-0,0118	-0,0070	-0,0005	0,0684
10	Δ Cond. Value at Risk	-0,0017	0,0065	-0,0281	-0,0058	-0,0028	0,0011	0,0317
	Δ Rendite	-0,0001	0,0048	-0,0218	-0,0030	-0,0001	0,0027	0,0186
	Δ Risiko (SD)	-0,0017	0,0049	-0,0177	-0,0047	-0,0029	0,0000	0,0340
20	Δ Cond. Value at Risk	-0,0006	0,0031	-0,0113	-0,0024	-0,0011	0,0008	0,0148
	Δ Rendite	0,0000	0,0024	-0,0109	-0,0015	-0,0001	0,0014	0,0091
	Δ Risiko (SD)	-0,0005	0,0023	-0,0072	-0,0019	-0,0012	0,0002	0,0138

Quelle: Eigene Berechnungen

4.2.3 Systematisches und unsystematisches Risiko der Biogasanlageninvestition

Um das Risiko einer Biogasanlageninvestition in einen systematischen und einen unsystematischen Anteil aufzuteilen, wird ein Marktindex zugrunde gelegt, um anschließend die Betafaktoren der einzelnen Biogasanlagen zu berechnen. Wie in Abbildung 67 dargestellt, beinhaltet der Index alle 180 Biogasanlagen der Stichprobe dieser Arbeit, die entsprechend ihrer durchschnittlichen Bilanzsumme gewichtet sind. Die Summe der durchschnittlichen Bilanzsummen der Biogasanlagen im Portfolio beträgt insgesamt 660.015.334 Euro, während die Gewichtungen der Einzelanlagen zwischen 0,04% und 4,21% liegen.

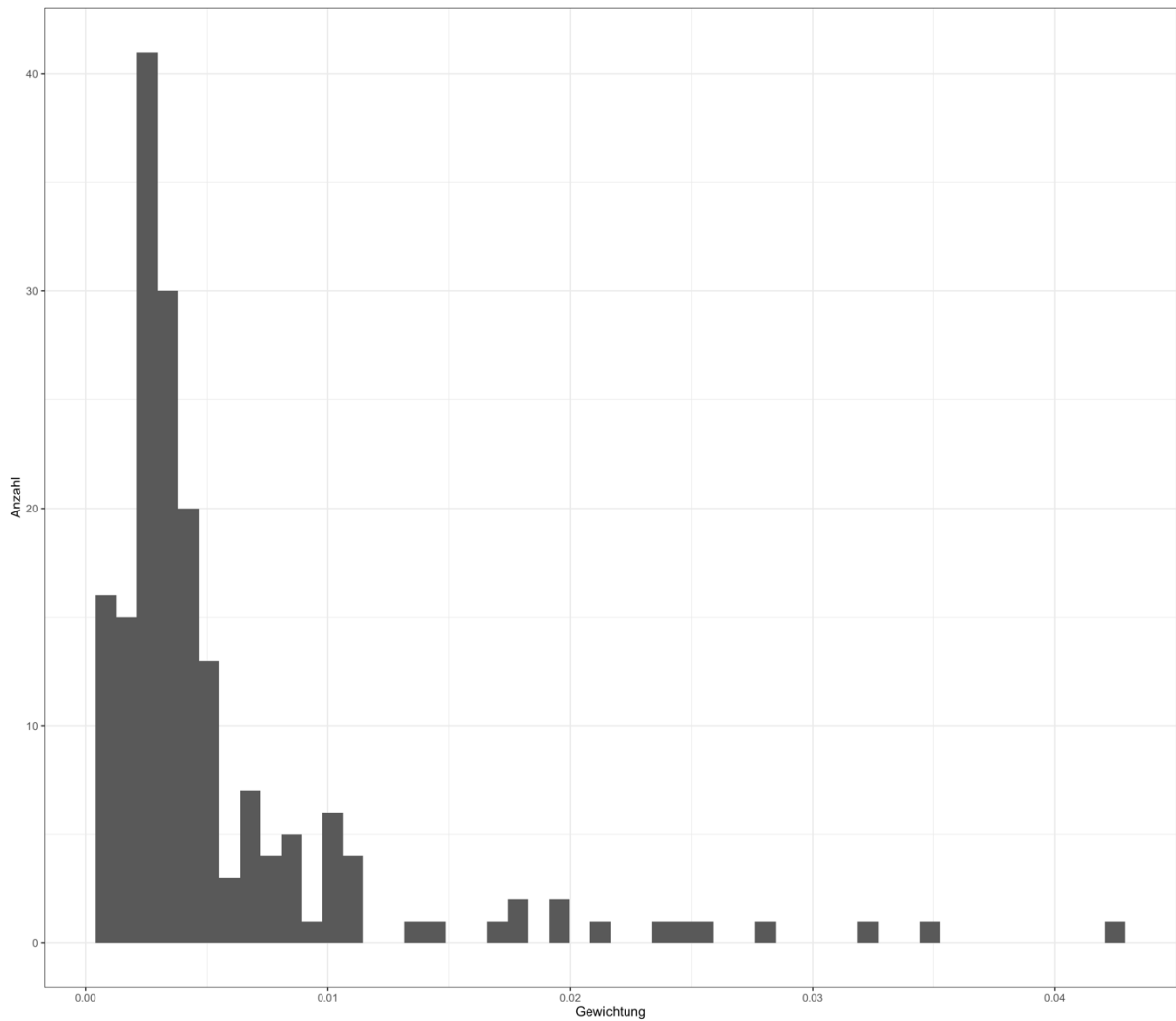


Abbildung 67: Häufigkeitsverteilung der Gewichtungen der einzelnen Biogasanlagen im Marktindex
Quelle: Eigene Darstellung

Ein Großteil der Gewichtungen im Index befindet sich im Bereich unter 1%. Tabelle 70 zeigt, dass das 75%-Quantil bei einer Gewichtung von 0,55% liegt. Nur 25% der Gewichtungen sind größer als 0,55%. Lediglich fünf Biogasanlagen weisen eine Gewichtung von mehr als 2,5% auf. Da auch die Biogasanlage mit der höchsten Gewichtung einen Anteil von unter 5% aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass der Index nicht zu stark durch einzelne Anlagen dominiert ist. Das Marktportfolio hat eine Rendite von 0,79% und eine Standardabweichung von 1,85%.

Tabelle 70: Deskriptive Statistik der Gewichtungen der Biogasanlagen im Marktindex

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Gewichtung	0,0056	0,0063	0,0004	0,0024	0,0034	0,0055	0,0421	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Ausgehend von dem Marktindex und dem daraus resultierenden systematischen Risiko werden die Betafaktoren der einzelnen Biogasanlagen ermittelt. Bei einem Betafaktor von null ist

die Einzelanlage unabhängig vom Marktrisiko. Anlagen, die einen Betafaktor zwischen null und eins aufweisen sind durch eine geringe Abhängigkeit des Marktes bzw. des Marktportfolios gekennzeichnet. Bei einem Betafaktor von eins entspricht das Risiko der Einzelanlage dem des Marktes. Ein Betafaktor größer eins sagt aus, dass die Renditen der Einzelanlage stärker schwanken als der Markt, bzw. die des Marktportfolios. Ist die Renditeentwicklung der Einzelanlage gegenläufig zu der des Marktportfolios, nimmt der Betafaktor negative Werte an. Das Histogramm in Abbildung 68 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Betafaktoren der 180 Biogasanlagen dieser Stichprobe.

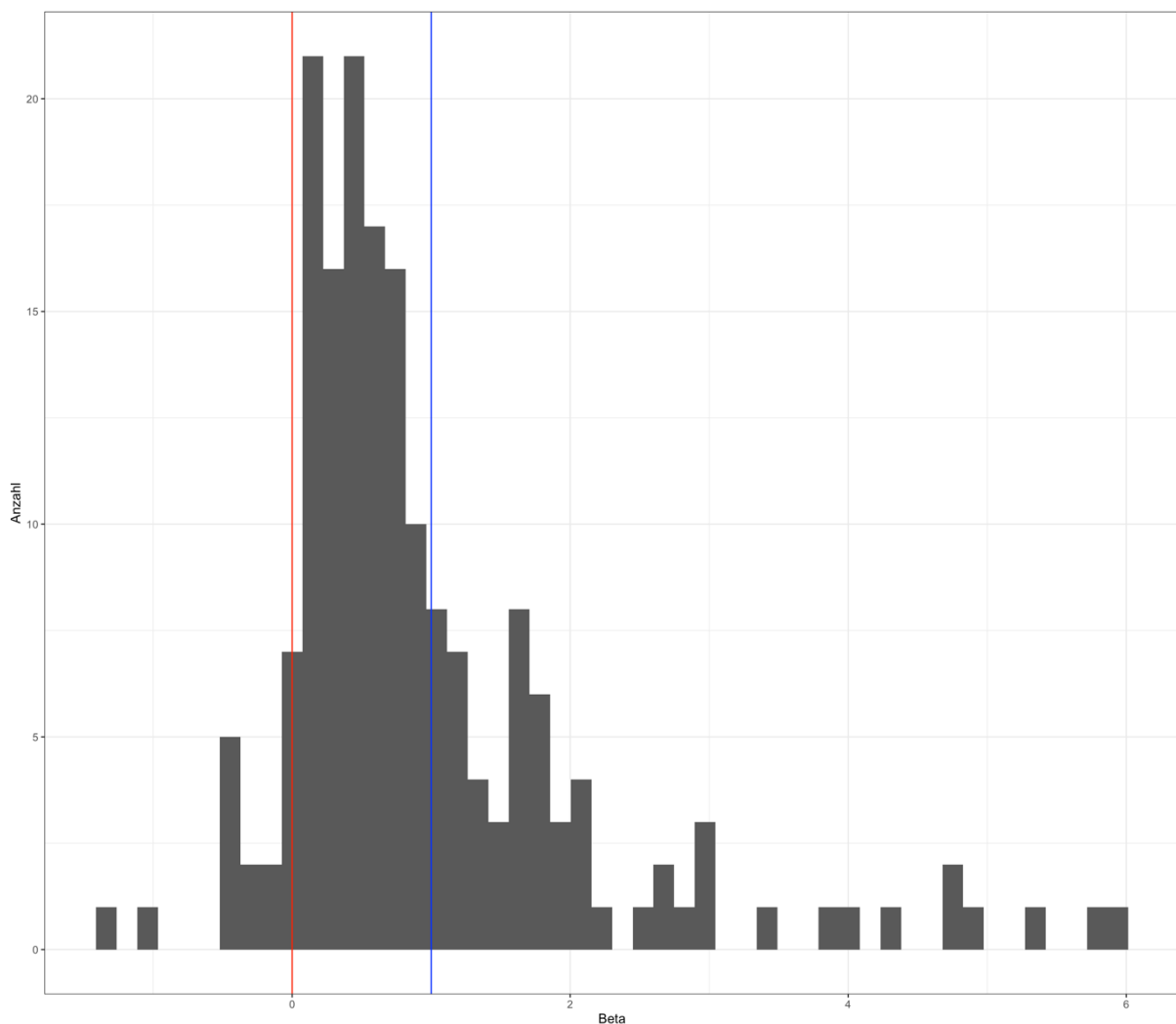


Abbildung 68: Häufigkeitsverteilung der Betafaktoren der Biogasanlagen
Quelle: Eigene Darstellung

Zwölf der 180 Biogasanlagen, also 6,63% weisen einen Betafaktor auf, der kleiner ist als Null. Die Renditen dieser Anlagen bewegen sich gegenläufig zum Markt. Rund 60% der Biogasanlagen weisen einen Betafaktor zwischen Null und eins auf und sind durch eine mehr oder wenige starke Abhängigkeit vom Index gekennzeichnet. In über 30% der Fälle ist der Betafaktor größer als eins und die Renditen der Anlagen schwanken dementsprechend stärker als der Index.

Der Mittelwert der Betafaktoren liegt fast bei eins, was auf einen starken Zusammenhang zwischen den Einzelanlagen und dem Marktportfolio schließen lässt. Dieser Wert scheint jedoch durch Ausreißer verzerrt zu sein, da der Median bei lediglich 0,65 liegt und demnach für eine geringere Abhängigkeit der Einzelanlagen vom Markt spricht. Der Wert des minimalen Betafaktors ist negativ und liegt bei -1,29, während der Maximalwert mit 5,98 deutlich über eins liegt. Das 25%-Quantil und das 75%-Quantil zeigen, dass 50% der Betafaktoren Werte zwischen 0,29 und 1,27 aufweisen (siehe Tabelle 71).

Tabelle 71: Deskriptive Statistik der Betafaktoren

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Beta	0,9814	1,1773	-1,2928	0,2944	0,6456	1,2731	5,9838	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Unter Berücksichtigung der Betafaktoren lässt sich die Standardabweichung als Maß für das Gesamtrisiko einer Biogasanlage in eine systematische und eine unsystematische Komponente aufteilen. Das Diagramm in Abbildung 69 zeigt auf der X-Achse die 180 Biogasanlagen und auf der Y-Achse das Risiko der jeweiligen Einzelanlage. In blau ist der Anteil des systematischen Risikos dargestellt und in rot der Anteil des unsystematischen Risikos.

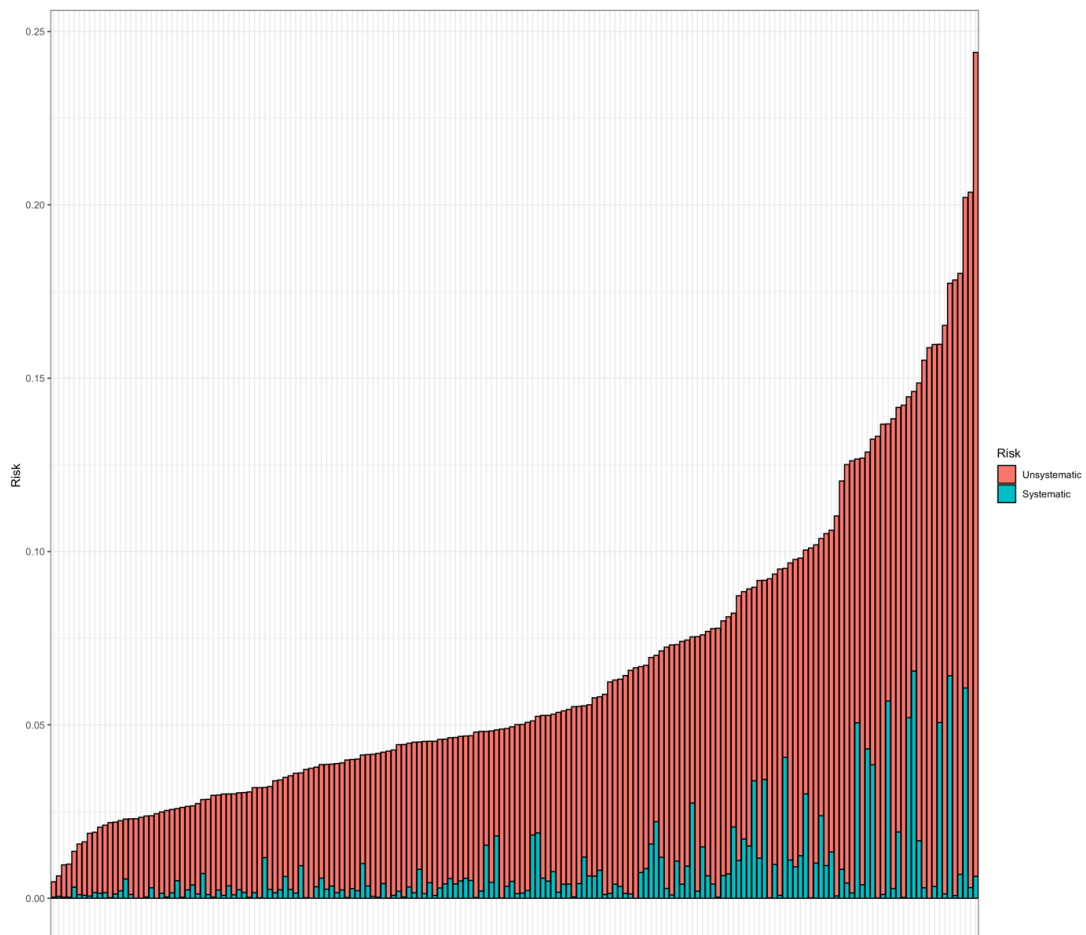


Abbildung 69: Systematisches und unsystematisches Risiko (SD) der Biogasanlagen
Quelle: Eigene Darstellung

Die Standardabweichung als Risikomaß der Einzelanlagen liegt im Mittel bei 6,58%, wobei das Minimum bei 0,48% liegt und das Maximum bei 24,40%. Der Mittelwert des systematischen Risikos der Einzelanlagen beträgt lediglich 0,78%. Demnach lassen sich im Mittel 5,81% des Risikos diversifizieren. Das Minimum des systematischen Risikos liegt bei 0,00% und das Maximum bei 6,55% (siehe Tabelle 72).

Tabelle 72: Deskriptive Statistik des systematischen und des unsystematischen Risikos der Biogasanlagen

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Systematisches Risiko	0,78%	1,27%	0,00%	0,11%	0,32%	0,84%	6,55%	180
Unsystematisches Risiko	5,81%	3,98%	0,44%	3,11%	4,55%	7,35%	23,76%	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Das Histogramm in Abbildung 69 zeigt, dass unabhängig von der Höhe des Gesamtrisikos der Einzelanlage der Anteil des unsystematischen Risikos überwiegt und einzelne Biogasanlagen (fast) kein systematisches Risiko aufweisen. Noch deutlicher stellt das Histogramm in Abbildung 70 diese Erkenntnis heraus. Es zeigt die Anteile des systematischen Risikos nicht als absoluten Wert, sondern im Verhältnis zum Gesamtrisiko der Einzelanlagen.

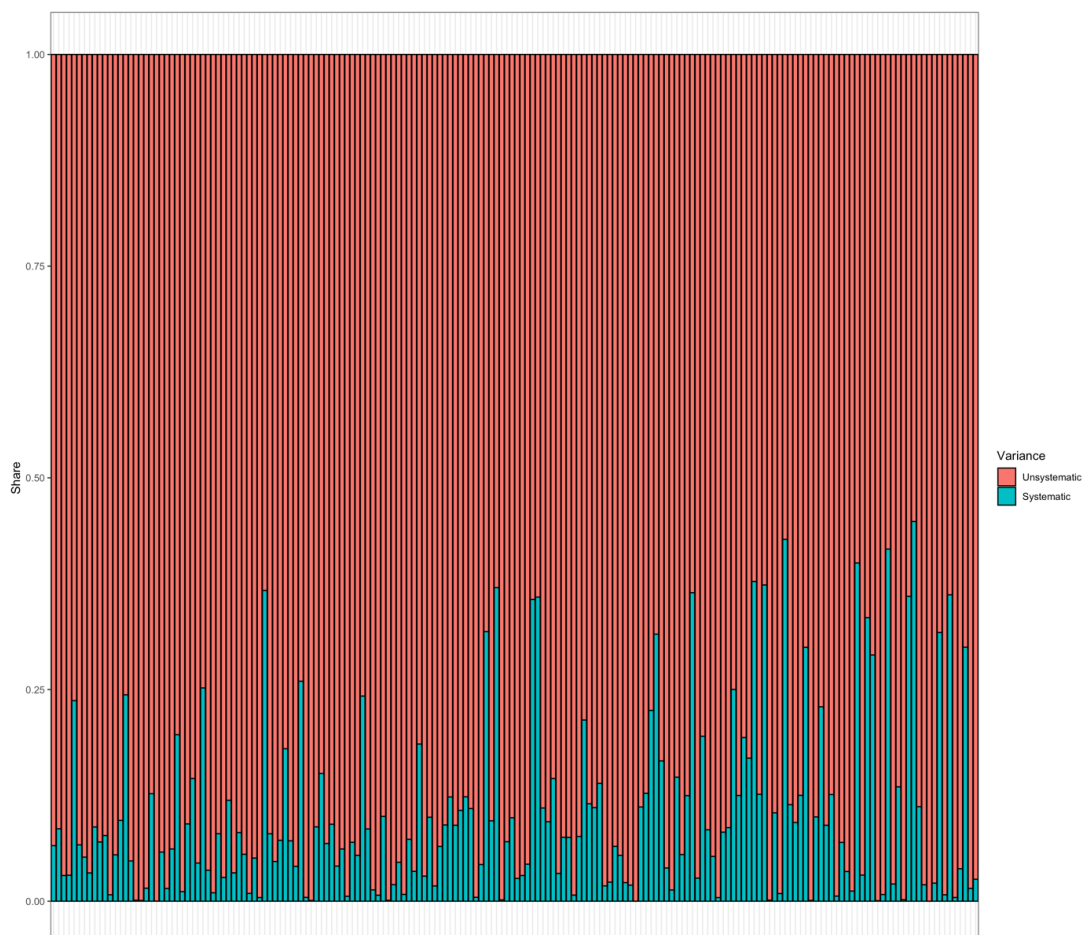


Abbildung 70: Anteile des systematischen und des unsystematischen Risikos (SD) am Gesamtrisiko der Biogasanlagen

Quelle: Eigene Darstellung

In keinem Fall liegt der Anteil des systematischen Risikos am Gesamtrisiko über 50%. Im Mittelwert liegt der Anteil bei nur 10,44% bei einem Minimum von 0,00% und einem Maximum von 44,84% (siehe Tabelle 73).

Tabelle 73: Deskriptive Statistik der Anteile des systematischen und des unsystematischen Risikos am Gesamtrisiko der Biogasanlagen

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Anteil systematisches Risiko	10,44%	10,88%	0,00%	2,67%	7,16%	12,61%	44,84%	180
Anteil unsystematisches Risiko	89,56%	10,88%	55,16%	87,39%	92,84%	97,33%	100,00%	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Bei den 180 Biogasanlagen dieser Stichprobe überwiegt der Anteil des anlagenspezifischen Risikos. Es liegt im Mittel bei 89,56% und im Maximum bei 100%. Im Gegensatz zum systematischen Risiko ist das unsystematische Risiko dadurch gekennzeichnet, dass es durch Portfoliobildung diversifiziert werden kann. Ausgehend von Abbildung 69 kann angenommen werden, dass der Anteil an Biogasanlagen mit einem hohen systematischen Risiko mit zunehmendem Gesamtrisiko der Einzelanlagen ebenfalls zunimmt. Es lässt sich vermuten, dass die 50% der Biogasanlagen mit dem höheren Gesamtrisiko mehr Extremwerte hinsichtlich des Anteils des systematischen Risikos aufweisen.

4.3 Erklärung der Modellparameter

4.3.1 Erklärung von Rendite und Risiko

4.3.1.1 Deskriptive Statistik der Variablen

Bevor das Regressionsmodell geschätzt wird, werden zunächst die Variablen beschrieben. In der Tabelle 74 sind die Eigenschaften der abhängigen Variablen Rendite, Standardabweichung (SD), Value at Risk (VaR) und Conditional Value at Risk (CVaR) dargestellt. Die zu erklärenden Variablen wurden bereits ausführlich in Kapitel 4.1 im Rahmen der Parameterschätzung beschrieben. Außerdem sind die Eigenschaften der unabhängigen Variablen Anlagevermögen (AV), Eigenkapitalquote (EK-Quote) und Alter der Biogas-Gesellschaften dargestellt. Auch die erklärenden Variablen wurden bereits umfassend in Kapitel 3.1.2 beschrieben.

Tabelle 74: Deskriptive Statistik der abhängigen und unabhängigen Variablen

	Rendite	SD	VaR	CVaR	AV	EK-Quote	Alter
Mittelwert	1,22	6,59	9,62	12,38	38,69	16,37	12,56
SD	5,01	4,47	8,96	10,56	43,88	20,06	2,17
Min	-14,79	0,48	-7,65	-6,30	2,80	-53,19	7,00
25%-Quantil	-1,58	3,47	3,52	5,21	15,78	3,38	10,75
Median	1,38	4,98	6,59	8,40	23,84	17,08	13,00
75%-Quantil	4,16	8,86	13,48	17,51	41,27	27,30	14,00
Max	20,14	24,40	40,32	48,25	272,78	93,46	15,00
N	180	180	180	180	180	180	180

Quelle: Eigene Berechnungen

Darüber hinaus berücksichtigt das Regressionsmodell die nominal skalierten Variablen Region und Rechtsform. Die Region Süd-Osten (Bayern) beinhaltet vier Biogasanlagen, die Region Nord-Ost 83, die Region Nord-West 74 und die Region Süd-West 19. Die Tabelle 75 zeigt außerdem die Mittelwerte der abhängigen Variablen für jede Region.

Tabelle 75: Deskriptive Statistik der abhängigen Variablen nach Region

	Rendite	SD	VaR	CVaR
Bayern (4)	3,58	8,20	9,91	13,33
Nord-Osten (83)	0,39	6,88	10,92	13,80
Nord-West (74)	2,44	6,39	8,07	10,74
Süd-Westen (19)	-0,38	5,80	9,92	12,34

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Region Süd-West ist durch die geringste durchschnittliche Rendite in Höhe von -0,38% gekennzeichnet, während Bayern die höchste durchschnittliche Rendite von 3,58% aufweist. Die Regionen Nord-Ost und Nord-West weisen vergleichsweise ähnliche Standardabweichungen auf. Die durchschnittliche Standardabweichung in Bayern ist mit 8,20% am höchsten, die in der Region Süd-West mit 5,80% am geringsten. Die alternativen Risikomaße Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk unterscheiden sich in Ihrer Rangfolge. Die in der deskriptiven Statistik dargestellten Mittelwerte lassen vermuten, dass sich die Variablen in Abhängigkeit der Region unterscheiden. Diese Vermutung wird in den weiteren Analysen verifiziert.

Neben der Region ist die Rechtsform eine weitere nominal skalierte Variable, die im Regressionsmodell berücksichtigt wird. Die Stichprobe beinhaltet 94 Gesellschaften mit beschränkter Haftung (GmbH), sowie 83 GmbH & Co. KG und 3 UG (haftungsbeschränkt) & Co. KG. Die beiden Mischformen GmbH & Co. KG und UG (haftungsbeschränkt) & Co. KG werden aufgrund ihrer Ähnlichkeit in der Kategorie KG zusammengefasst. Die Tabelle 76 zeigt außerdem die Mittelwerte der abhängigen Variablen nach Rechtsform.

Tabelle 76: Deskriptive Statistik der abhängigen Variablen nach Rechtsform

	Rendite	SD	VaR	CVaR
GmbH (94)	0,79	6,40	9,75	12,42
KG (86)	1,70	6,80	9,48	12,33

Quelle: Eigene Berechnungen

Bei den Mittelwerten der Rendite ist ein Unterscheid in Abhängigkeit der Rechtsform zu erkennen, während sich die Risikomaße Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk kaum unterscheiden. Auch diese Vermutungen werden in den folgenden Analysen verifiziert.

Tabelle 77 zeigt den Zusammenhang der Variablen in Form einer Korrelationsmatrix. Betrachtet man die Zusammenhänge zwischen den unabhängigen und den abhängigen Variablen, ist zu erkennen, dass die Rendite die stärkste positive Korrelation mit der Eigenkapitalquote

aufweist. Der positive Zusammenhang zwischen Eigenkapitalquote und Rendite entspricht der Erwartung und der formulierten Hypothese, dass die Rendite umso höher ist, je höher die Eigenkapitalquote. Zwischen dem Anlagevermögen und der Rendite ist eine negative Korrelation zu beobachten. Das wiederum widerspricht dem in der Hypothese angenommenen positiven Zusammenhang zwischen Anlagevermögen und Rendite. Vermutet wurde, dass große Biogasanlagen z.B. aufgrund von Skaleneffekte höhere Renditen erzielen. Zwischen dem Alter und der Rendite einer Biogasanlage besteht ein leicht positiver Zusammenhang. Der positive Zusammenhang zwischen der Rendite und der erklärenden Variablen Alter entspricht den Erwartungen und der in Kapitel 3.2.3.1 aufgestellten Hypothese.

Tabelle 77: Korrelationsmatrix der abhängigen und unabhängigen Variablen des Regressionsmodells

	Rendite	SD	VaR	CVaR	AV	EK-Quote	Alter
Rendite	1,0000						
SD	-0,0152	1,0000					
VaR	-0,5714	0,8292	1,0000				
CVaR	-0,4875	0,8804	0,9951	1,0000			
AV	-0,4016	-0,2319	0,0342	-0,0120	1,0000		
EK-Quote	0,5670	-0,1477	-0,4382	-0,3979	-0,2214	1,0000	
Alter	0,1096	0,2257	0,1240	0,1451	-0,1657	0,0266	1,0000

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Standardabweichung als Risikomaß korreliert am stärksten mit der Höhe des Anlagevermögens. Zwischen dem Anlagevermögen und der Standardabweichung ist ein negativer Zusammenhang zu erkennen. Erwartet wurde hier ein positiver Zusammenhang. Zwischen dem Eigenkapitalanteil und der Standardabweichung wurde ein negativer Zusammenhang ermittelt, was der formulierten Hypothese entspricht. Zwischen der Standardabweichung und dem Alter besteht ein positiver Zusammenhang. Die Hypothese wurde jedoch einem negativen Zusammenhang entsprechend formuliert.

Beim Value at Risk besteht ein negativer Zusammenhang mit der Eigenkapitalquote. Dieser war zu erwarten und wurde so in der Hypothese beschrieben. Die Höhe des Anlagevermögens korreliert leicht positiv mit dem Value at Risk. In der Hypothese war für diesen Fall ein negativer Zusammenhang formuliert. Das Alter korreliert ebenfalls leicht positiv mit dem Value at Risk. In den Hypothesen ist ein negativer Zusammenhang formuliert.

Auch beim Conditional Value at Risk besteht der stärkste Zusammenhang mit dem Eigenkapitalanteil. Wie beim Value at Risk ist dieser Zusammenhang negativ, was auch dementsprechend in der Hypothese formuliert war. Die Höhe des Anlagevermögens korreliert, anders als beim Value at Risk, leicht negativ mit dem Conditional Value at Risk. Der negative Zusammenhang war erwartet. Das Alter korreliert entgegen den Erwartungen positiv mit dem Conditional Value at Risk.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Eigenkapitalquote, außer bei der Standardabweichung als Risikomaß, den stärksten Zusammenhang mit den abhängigen Variablen

aufweist. Bei der Formulierung der Hypothesen wurde davon ausgegangen, dass der Zusammenhang zwischen den alternativen Risikomaßen Standardabweichung, Value at Risk sowie Conditional Value at Risk und den unabhängigen Variablen die gleiche Richtung aufweist. Beobachtet wurden jedoch unterschiedliche Richtungen bei der unabhängigen Variable Alter. Auffällig ist außerdem, dass die Höhe des Anlagevermögens verhältnismäßig hohe Korrelationskoeffizienten mit den Variablen Rendite und Standardabweichung aufweist, während nur eine sehr niedrige Korrelation mit dem Value at Risk und dem Conditional Value at Risk beobachtet wurde. Die Rendite weist insgesamt die höchsten Korrelationskoeffizienten auf, so dass davon auszugehen ist, dass die Rendite durch die unabhängigen Variablen im Regressionsmodell im Vergleich am besten zu erklären ist.

Weiterhin wird die Korrelation zwischen den abhängigen Variablen analysiert. Der sehr schwach negative Zusammenhang zwischen Rendite und der Standardabweichung als Risikomaß widerspricht auch der allgemeinen Annahme, dass das Risiko umso höher ist, je höher die Rendite. Ein sehr hoher Zusammenhang ist erwartungsgemäß zwischen dem Value at Risk und dem Conditional Value at Risk zu erkennen. Das führt vermutlich dazu, dass die Ergebnisse der Regression sehr ähnlich ausfallen werden. Darüber hinaus korrelieren Value at Risk und Conditional Value at Risk stark positiv mit der Standardabweichung als Risikomaß und weniger stark negativ mit der Rendite. Demnach ist der Haupttreiber für den Value at Risk und den Conditional Value at Risk die Standardabweichung und nicht die Rendite. Im Gegensatz zur Standardabweichung als Risikomaß berücksichtigen die Risikomaße Value at Risk und Conditional Value at Risk auch die Lage der Rendite und nicht nur die Streuung um den Mittelwert.

Neben der Korrelation zwischen den unabhängigen und den abhängigen Variablen wird die Korrelation unter den unabhängigen Variablen untersucht, um ggf. Multikollinearität aufzudecken. Die Korrelationen der unabhängigen Variablen untereinander ist gering, sodass die Gefahr von Multikollinearität eher gering eingeschätzt werden kann. Außerdem wird im Folgenden mit dem Variance Inflation Factor überprüft, ob Multikollinearität vorliegt.

4.3.1.2 Erklärung der Rendite

In Abbildung 71 ist der Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Rendite und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform als Scatterplot bzw. Boxplot grafisch dargestellt. Zwischen der Höhe des Anlagevermögens und der Rendite ist ein nicht linearer Zusammenhang erkennbar. Der Verlauf der Regressionskurve lässt auf einen kubischen Zusammenhang schließen.

Bis zu einem Anteil von 50% entspricht der Zusammenhang zwischen der Höhe des Eigenkapitals und der Rendite einem linearen Verlauf. Berücksichtigt man jedoch Eigenkapitalquoten von mehr als 50% ist ein nicht linearer Zusammenhang zu erkennen. Für Eigenkapitalquoten

größer als 50% liegen jedoch wenig Datenpunkte vor und diese streuen sehr stark. Für die gesamte Regressionskurve kann eine quadratische Funktion zugrunde gelegt werden.

Obwohl das „Generalized additive model“ (GAM) für die Darstellung der Regressionskurve sehr flexibel ist, ist bei der unabhängigen Variable Alter eindeutig ein ausschließlich linearer Zusammenhang zu erkennen. Die Regressionsgerade steigt leicht positiv.

Bei den Boxplots für die nominal skalierten Variablen Region und Rechtsform stellt die gestrichelte Linie den Mittelwert dar, während die durchgängige Linie für den Median steht. Der Mittelwert der Renditen in den Regionen Bayern und Nord-West liegt ganz leicht über den Renditen der Regionen Nord-Ost und Süd-West. Insgesamt überschneiden sich die Verteilungen der Renditen so stark, dass ein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit der Region nicht zu erkennen ist.

Auch die Unterschiedlichkeit der Renditen in Abhängigkeit von der Rechtsform ist ebenfalls sehr gering. Biogasgesellschaften in der Rechtsform einer GmbH weisen eine leicht niedrigere Rendite auf als die einer KG. Die Länge der Whiskers im Boxplot zeigt, dass die Renditen der KGs stärker streuen als die Renditen der GmbHs. Die Unterschiede im Mittelwert sind so gering, dass sie wahrscheinlich im Zufall begründet sind und sich nicht signifikant unterscheiden.

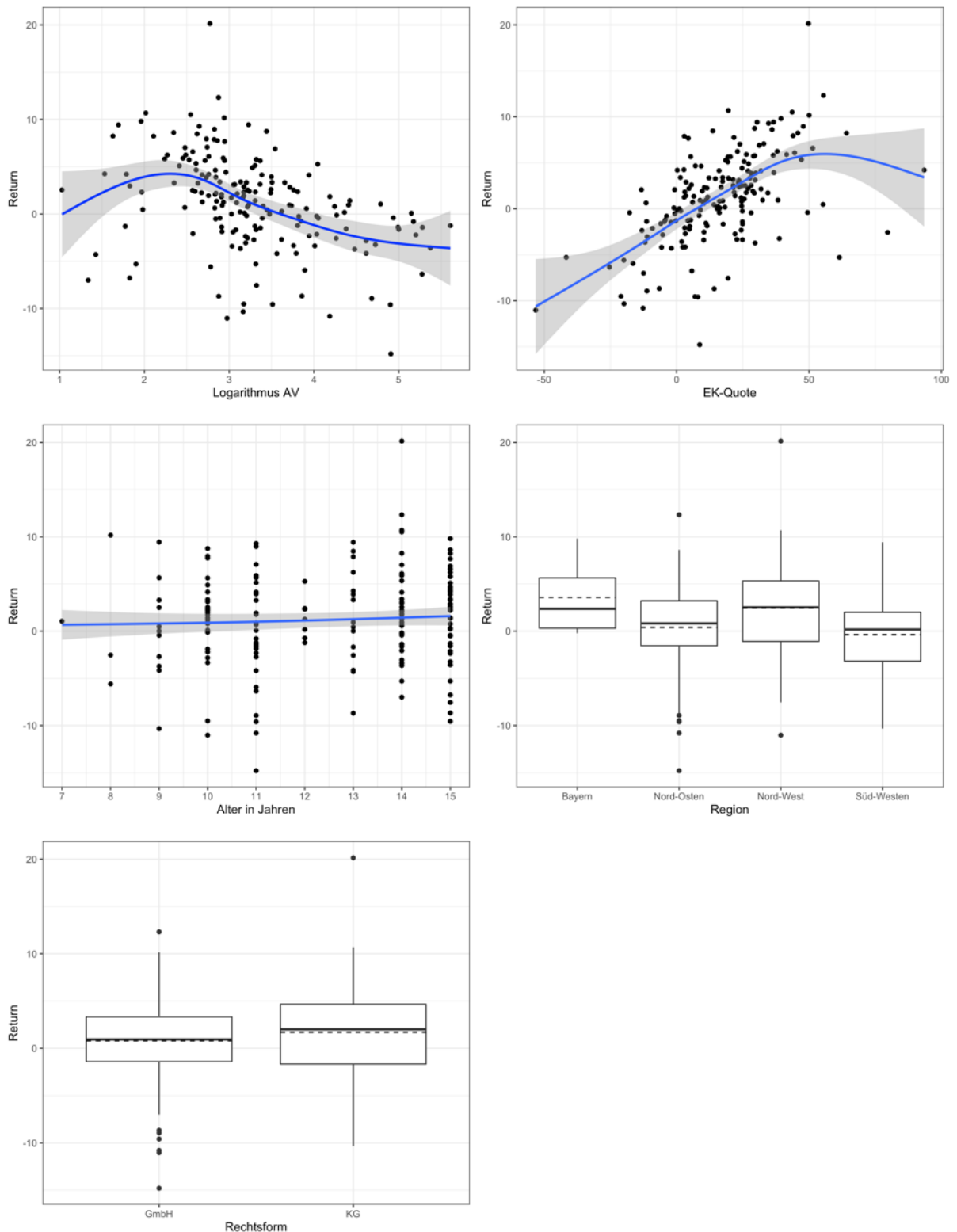


Abbildung 71: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Rendite und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform
 Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse der Schätzung des Regressionsmodells sind in Tabelle 78 dargestellt. Im ersten Modell werden alle Variablen berücksichtigt und die Regressionskoeffizienten unter Annahme eines linearen Zusammengangs der Variablen geschätzt. Das zweite Modell berücksichtigt nur jene Variablen, die sich als signifikant bei einem Niveau von 5%

herausgestellt haben, wenn iterativ nicht signifikante Variablen aus dem ersten Modell entfernt wurden. Im dritten Modell sind nicht nur lineare Zusammenhänge, sondern auch nichtlineare Zusammenhänge berücksichtigt.

Bevor die Variablen im einzelnen betrachtet werden, soll zunächst die Güte der drei Modelle verglichen werden. Die grafische Analyse der Cooks Distance hat ergeben, dass für alle drei Modelle keine einflussreichen Ausreißer vorliegen. Somit können alle Datenpunkte für die Erklärung der Rendite im Regressionsmodell berücksichtigt werden.

Der Breusch Pagan Test hat ergeben, dass bei den Modellen 1 und 3 Homoskedastizität vorliegt (P-Wert $> 0,05$). Das zweite Modell dagegen entspricht nicht der Homoskedastizitätsannahme (P-Wert $< 0,05$). Demnach werden ausschließlich robuste Standardfehler verwendet.

Die Annahme normalverteilter Residuen wurde mit dem Shapiro Wilk Test überprüft, wobei für alle drei Modelle die Nullhypothese abgelehnt werden muss. Die Residuen sind demnach nicht normalverteilt. Das hat zur Folge, dass die Hypothesentests nur asymptotisch valide sind. Von einer Box-Cox-Transformation der abhängigen Variable wird dennoch zu Gunsten der Interpretierbarkeit des Modells abgesehen.

Der Variance Inflation Factor liegt für alle Variablen der ersten beiden Modelle unter zwei und damit unter dem Schwellenwert von zehn. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass keine Multikollinearität vorliegt. Beim dritten Modell liegt der Variance Inflation Factor für die Variablen Eigenkapitalquote, und quadrierte Eigenkapitalquote sowie Anzahl der Beobachtungen unter drei und damit unter dem Schwellenwert von zehn. Auch hier liegt keine Multikollinearität vor. Um mit der Multikollinearität bei den Variablen Anlagevermögen, quadriertes Anlagevermögen und kubisches Anlagevermögen umzugehen, wurden diese Variablen zentriert („demeaned“). Von der jeweiligen Variable wurde ihr Mittelwert abgezogen. Durch diese Anpassung, liegt auch bei diesen drei Variablen der Variance Inflation Factor unter vier und damit unter dem Schwellenwert von zehn. Durch die Zentrierung entsprechen die Koeffizienten der Abweichung vom Mittelwert.

Die F-Statistik ist für alle drei Modelle zum Niveau 1% signifikant. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) sinkt beim zweiten Modell leicht im Vergleich zum ersten durch das Weglassen der nicht signifikanten Variablen. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß bleibt jedoch fast gleich. Obwohl das zweite Modell weniger Variablen berücksichtigt, bleibt der Erklärungsgehalt des Modells fast gleich. Vergleicht man die Quadratsummen der Residuen von Modell 1 und Modell 2 mit einem F-Test, zeigt das Ergebnis, dass diese sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Der P-Wert beträgt 0,4366, sodass bei einem Signifikanzniveau von 5% die Nullhypothese „Der Erklärungsgehalt von Modell 1 und Modell 2 unterscheiden sich nicht“ beibehalten werden

kann. Demzufolge haben die nichtsignifikanten unabhängigen Variablen (Alter, Region und Rechtsform) keinen Erklärungsgehalt für die abhängige Variable Rendite.

Vergleicht man die ersten beiden Modelle mit dem dritten, welches auch nicht lineare Zusammenhänge berücksichtigt, ist zu erkennen, dass das Bestimmtheitsmaß um über 8%-Punkte bzw. über 9%-Punkte steigt. Mit diesem Regressionsmodell lassen sich 50% der Varianz der Rendite erklären. Auch das adjustierte Bestimmtheitsmaß steigt im gleichen Umfang. Die Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge führt demnach zu einer Verbesserung der Modellgüte. Vergleicht man die Quadratsummen der Residuen von Modell 2 und Modell 3 mit einem F-Test, zeigt das Ergebnis, dass sich diese signifikant voneinander unterscheiden. Der P-Wert beträgt $7,25E-07$, sodass bei einem Signifikanzniveau von 5% die Nullhypothese „der Erklärungsgehalt von Modell 2 und Modell 3 unterscheiden sich nicht“ abgelehnt werden muss. Dementsprechend wird die Modellgüte durch die Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge signifikant verbessert.

Tabelle 78: Ergebnisstabelle der multiplen linearen Regression der Rendite

Abh. Variable: Rendite	Modell (1)	Modell (2)	Modell (3)
log (AV)	-1.456*** (0.375)	-1.696*** (0.424)	
log (AV) demeaned			-3.737*** (0.611)
(log (AV) demeaned)^2			-0.634** (0.258)
(log (AV) demeaned)^3			0.887*** (0.218)
EKQ	0.125*** (0.015)	0.125*** (0.023)	0.174*** (0.019)
(EKQ)^2			-0.001*** (0.000)
ALT	0.141 (0.139)		
REG (Nord-Ost)	-0.454 (2.051)		
REG (Nord-West)	0.592 (2.054)		
REG (Süd-West)	-1.095 (2.240)		
REFO (KG)	0.184 (0.642)		
(Konstante)	2.156 (2.937)	4.683*** (1.525)	-0.481*** (0.392)
N	180	180	180
R2	0.418	0.402	0.500
Adjusted R2	0.394	0.395	0.486
Standardfehler	3.896 (df=172)	3.894 (df=177)	3.591 (df=174)
F-Statistik	17.653*** (df=7; 172)	59.403*** (df=2; 177)	34.797*** (df=5; 174)

*p<0,1 **p<0,05 ***p<0,01

Quelle: Eigene Berechnungen

Im folgenden werden die Regressionskoeffizienten interpretiert und die in Kapitel 3.2.3.1 formulierten Hypothesen zur Rendite untersucht.

Anlagevermögen

Das Anlagevermögen beeinflusst die Rendite bei einem Niveau von 5% signifikant. Der P-Wert ist im linearen Modell dabei sogar geringer als 0,01. Der Zusammenhang zwischen dem Anlagevermögen und der Rendite ist negativ, sodass die Hypothese „je höher das Anlagevermögen, desto höher die Rendite“ verworfen wird. Entgegen der Annahme sind kleine Biogasanlagen erfolgreicher als große Anlagen.

Im zweiten Modell wurde der lineare Zusammenhang für das logarithmierte Anlagevermögen geschätzt. Die Änderungsrate der Rendite beträgt unabhängig von der Höhe des logarithmierten Anlagevermögens $-1,70\%$. Die rote Kurve in Abbildung 72 zeigt die Änderungsrate der Rendite in Abhängigkeit des logarithmierten Anlagevermögens.

Um zu beschreiben wie sich die Rendite in Abhängigkeit des Anlagevermögens ändert, wird das logarithmierte Anlagevermögen exponiert. Die Änderung der Rendite in Abhängigkeit des Anlagevermögens ist dadurch nicht linear. Sie folgt dem in Abbildung 72 rot dargestellten Verlauf. Zunächst steigt die Änderungsrate der Rendite mit zunehmendem Anlagevermögen stark an. Dann nimmt die Änderungsrate ab und läuft gegen null. Sie verläuft ausschließlich im negativen Bereich. Die Änderungsrate der Rendite für den Mittelwert des Anlagevermögens in Höhe von 3,87 Mio. Euro beträgt $-0,0438\%$.

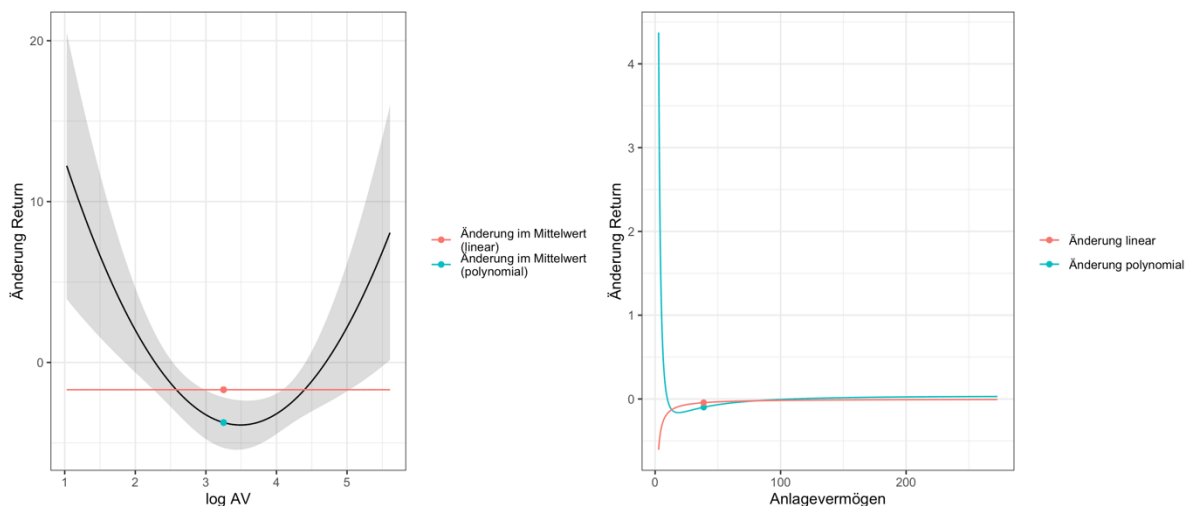


Abbildung 72: Änderung der Rendite (%-Punkte) in Abhängigkeit des Anlagevermögens
Quelle: Eigene Darstellung

Besser beschrieben wird der Zusammenhang zwischen dem Anlagevermögen und der Rendite jedoch durch eine kubische Funktion (Modell 3). Die drei transformierten Variablen des logarithmierten Anlagevermögens haben bereits einzeln bei einem Niveau von 5% einen signifikanten Einfluss auf die Rendite. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der drei Variablen beträgt $1,23E-09$ und ist damit noch deutlich kleiner als 1%.

Die Änderungsrate der Rendite in Abhängigkeit des (kubischen) logarithmierten Anlagevermögens folgt dem in Abbildung 72 dargestellten quadratischen Verlauf. Für den Mittelwert des logarithmierten Anlagevermögens in Höhe von 3,25, was einem Geldbetrag von 2,58 Mio. Euro entspricht, beträgt die Änderungsrate der Rendite $-3,56\%$. Die Differenz der Änderungsraten im Mittelwert zwischen dem linearen Modell und dem polynomialen Modell beträgt $1,84\%$ -Punkte.

Durch Exponieren des Anlagevermögens können Aussagen zur Änderungsrate der Rendite in Abhängigkeit des Anlagevermögens gemacht werden. Die Änderungsrate unter

Berücksichtigung des kubischen Zusammenhangs zwischen Anlagevermögen und Rendite ist in Abbildung 72 durch die blaue Kurve dargestellt. Die Änderungsrate der Rendite für den Mittelwert des Anlagevermögens in Höhe von 3,87 Mio. Euro unter Berücksichtigung des nicht linearen Zusammenhangs beträgt -0,0986%.

Eigenkapitalquote

Auch der positive Zusammenhang zwischen Eigenkapitalquote und der Rendite ist signifikant bei einem Niveau von 5%. Die Hypothese „je höher die Eigenkapitalquote, desto höher die Rendite“ kann also nicht verworfen werden. Im zweiten Modell beträgt der Regressionskoeffizient unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs 0,125%. Wenn die Eigenkapitalquote um 1% steigt, steigt die Rendite um 0,125%. Oder anders ausgedrückt, wenn die Eigenkapitalquote um 10% steigt, steigt die Rendite um 1,25%. Die Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs ist konstant und durch die rote Gerade in Abbildung 73 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen der Eigenkapitalquote und der Rendite wird jedoch am besten durch eine quadratische Funktion beschrieben. Die beiden transformierten Variablen der Eigenkapitalquote haben bereits einzeln bei einem Niveau von 5% einen signifikanten Einfluss auf die Rendite. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der beiden Variablen beträgt $1,21E-17$ und ist damit noch deutlich kleiner als 1%.

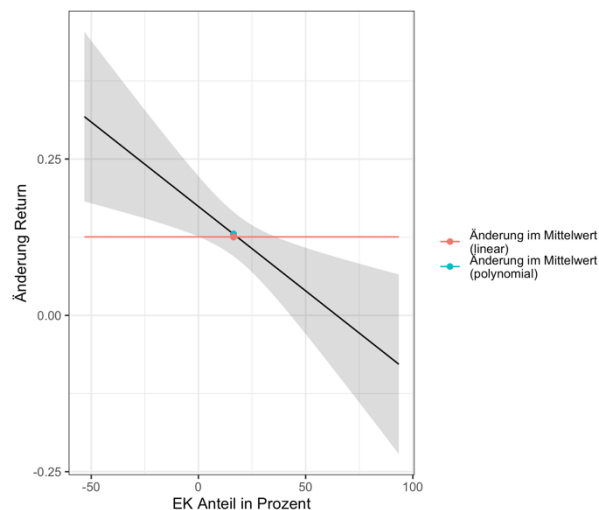


Abbildung 73: Änderung der Rendite in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote
Quelle: Eigene Darstellung

Ausgehend von einem quadratischen Zusammenhang verläuft die Kurve, die die Änderungsrate in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote beschreibt, linear. Die Änderungsrate der Rendite sinkt mit zunehmender Eigenkapitalquote. Ab einem Eigenkapitalanteil von rund 65% ist die Änderungsrate negativ. Berücksichtigt man das Konfidenzintervall, unterscheidet sich die Änderungsrate bereits ab einer Eigenkapitalquote von rund 43% nicht mehr signifikant von Null. Die Änderungsrate, im Mittelwert der Eigenkapitalquote in Höhe von 16,37%, beträgt

0,13%. Sie liegt im positiven Bereich und entspricht fast der Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs zwischen der Eigenkapitalquote und der Rendite.

Alter

Der Regressionskoeffizient für das Alter der Biogasanlage hat ein negatives Vorzeichen, ist jedoch nicht signifikant bei einem Niveau von 5%. Da kein signifikanter Zusammenhang besteht, wird die Hypothese „je höher das Alter, desto höher die Rendite“ abgelehnt.

Region

Biogasanlagen in den Regionen Nord-Ost und Süd-West haben im Mittel eine geringere Rendite als die der Referenzregion Süd-Ost. Die Biogasanlagen in der Region Nord-West haben eine höhere Rendite als die der Referenzregion Süd-Ost. Die ungerichtete Hypothese „die Rendite unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Region“ muss dennoch abgelehnt werden, da zum Signifikanzniveau von 5% kein Zusammenhang besteht. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der Variablen beträgt 0,4576 und damit deutlich über 0,05.

Rechtsform

Die Biogas-Gesellschaften in der Rechtsform KG haben im Mittel eine höhere Rendite als die in der GmbH (Referenzgröße). Der Unterschied ist jedoch nicht signifikant. Auch die Rechtsform der Projektgesellschaft hat keinen Einfluss auf die Rendite bei einem Signifikanzniveau von 5%. Die Hypothese „die Rendite unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Rechtsform“ muss demnach abgelehnt werden.

4.3.1.3 Erklärung der Standardabweichung

Der Zusammenhang zwischen der abhängigen Variablen Standardabweichung als Risikomaß und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform als Scatterplot bzw. Boxplot ist in Abbildung 74 grafisch dargestellt. Zwischen dem logarithmierten Anlagevermögen und der Standardabweichung als Risikomaß ist ein negativer Zusammenhang erkennbar.

Der Zusammenhang zwischen der Eigenkapitalquote und der Standardabweichung als Risikomaß ist nicht linear und leicht negativ. Die Form der Regressionskurve lässt sich durch einen quadratischen Zusammenhang beschreiben.

Analog zur Rendite ist ein positiver Zusammenhang zwischen der unabhängigen Variable Alter und der Standardabweichung als Risikomaß zu erkennen. Je älter die Biogasanlage desto größer ist das Risiko.

Bei den Boxplots für die nominal skalierten Variablen Region und Rechtsform stellt wiederum die gestrichelte Linie den Mittelwert dar, während die durchgängige Linie für den Median steht.

Der Mittelwert der Standardabweichung als Risikomaß in der Region Bayern liegt leicht über den Standardabweichungen der Regionen Nord-Ost, Nord-West und Süd-West. Die Verteilungen der Standardabweichungen als Risikomaß überschneiden sich stark. Ein Unterschied in Abhängigkeit von der Region ist lediglich für die Region Bayern denkbar, wobei zu berücksichtigen ist, dass diese Region nur vier Biogasanlagen beinhaltet.

Wie bei der Rendite ist auch die Unterschiedlichkeit der Standardabweichungen als Risikomaß in Abhängigkeit von der Rechtsform sehr gering. Biogasgesellschaften in der Rechtsform einer GmbH weisen ein minimal niedrigeres Risiko auf als die einer KG. Die Standardabweichungen der Kommanditgesellschaften schwanken etwas stärker um den Mittelwert als die der GmbH. Bei der GmbH dagegen gibt es mehr Ausreißer nach oben als bei der KG. Die Unterschiede im Mittelwert sind so gering, dass sie sich wahrscheinlich nicht signifikant unterscheiden.

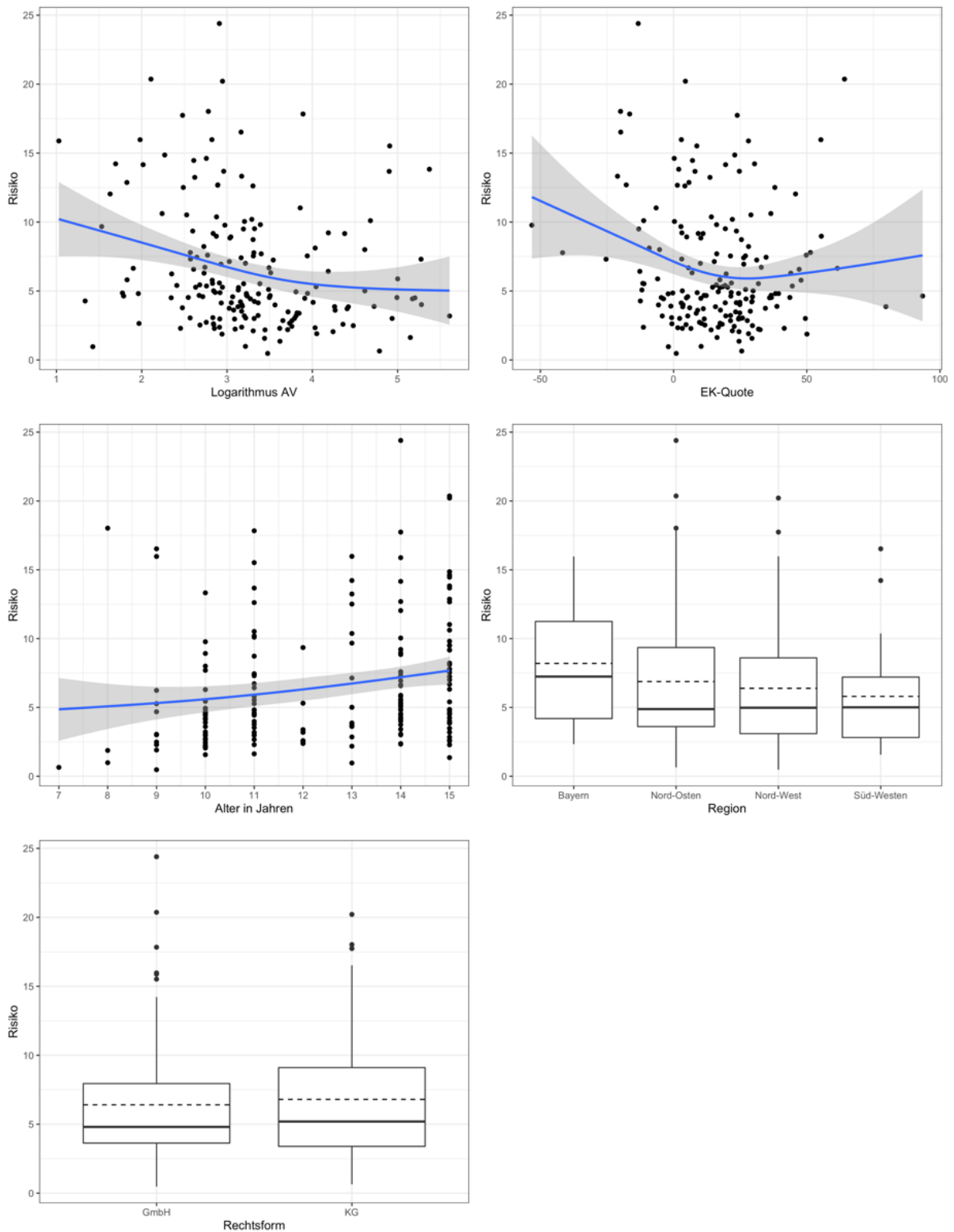


Abbildung 74: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Standardabweichung und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform
 Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 79 zeigt die Ergebnisse der Schätzung des Regressionsmodells. Wie bei der Rendite werden im ersten Modell alle Variablen unter Annahme eines linearen Zusammenhangs berücksichtigt, während das zweite Modell nur Variablen, die sich als signifikant bei einem

Niveau von 5% herausgestellt haben, enthält. Das dritte Modell wiederum berücksichtigt auch nichtlineare Zusammenhänge.

Bei allen drei Modelle liegen keine einflussreichen Ausreißer vor, sodass alle vorhandenen Datenpunkte im Regressionsmodell berücksichtigt werden. Die Modelle entsprechen jedoch nicht der Homoskedastizitätsannahme, da der P-Wert des Breusch Pagan Test unter dem Signifikanzniveau von 0,05 liegt. Demnach werden ausschließlich robuste Standardfehler verwendet.

Das Ergebnis des Shapiro Wilk Test verlangt, dass die Nullhypothese „die Residuen sind normalverteilt“ für alle drei Modelle abgelehnt werden muss. Die Hypothesentests sind demnach nur asymptotisch valide. Von einer Box-Cox-Transformation der abhängigen Variable wird zu Gunsten der Interpretierbarkeit des Modells dennoch abgesehen. Da der Schwellenwert für den Variance Inflation Factor von zehn bei allen Variablen der drei Modelle unterschritten wurde, kann davon ausgegangen werden, dass keine Multikollinearität vorliegt.

Auch bei der Standardabweichung als abhängige Variable sind alle drei Modelle zum Niveau 1% signifikant (F-Statistik). Das Bestimmtheitsmaß (R^2) sinkt beim zweiten Modell im Vergleich zum ersten durch das Weglassen der nicht signifikanten Variablen. Auch das adjustierte Bestimmtheitsmaß sinkt leicht, jedoch nicht so stark wie R^2 . Durch das Weglassen der insignifikanten Variablen sinkt der Erklärungsgehalt des Modells leicht. Vergleicht man die Quadratsummen der Residuen mit einem F-Test, zeigt das Ergebnis, dass sich Modell 1 und Modell 2 nicht signifikant voneinander unterscheiden. Der P-Wert beträgt 0,1887, sodass bei einem Signifikanzniveau von 5% die Nullhypothese „der Erklärungsgehalt von Modell 1 und Modell 2 unterscheiden sich nicht“ beibehalten werden muss. Demzufolge haben die nichtsignifikanten unabhängigen Variablen (Region und Rechtsform) keinen Erklärungsgehalt für die abhängige Variable Standardabweichung als Risikomaß.

Der Vergleich des zweiten Modells mit dem dritten zeigt, dass das Bestimmtheitsmaß steigt. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß steigt um 1,8%-Punkte gegenüber dem zweiten Modell. Mit dem dritten Modell können 15,3% der Varianz der Standardabweichung als Risikomaß durch die Regressoren erklärt werden. Vergleicht man die Quadratsummen der Residuen von Modell 2 und Modell 3 mit einem F-Test, zeigt das Ergebnis, dass sich diese signifikant voneinander unterscheiden. Die Nullhypothese „der Erklärungsgehalt von Modell 2 und Modell 3 unterscheiden sich nicht“ wird abgelehnt, da der P-Wert mit 0,045 unter dem Signifikanzniveau von 5% liegt. Durch die Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge wird die Modellgüte signifikant verbessert.

Tabelle 79: Ergebnisstabelle der multiplen linearen Regression der Standardabweichung

Abh. Variable: SD	Modell (1)	Modell (2)	Modell (3)
log (AV)	-1.382*** (0.471)	-1.284*** (0.442)	-1.222*** (0.437)
EKQ	-0.050** (0.020)	-0.046** (0.020)	-0.078*** (0.030)
(EKQ)^2			0.001*** (0.001)
ALT	0.415** (0.164)	0.393** (0.156)	0.378** (0.154)
REG (Nord-Ost)	-0.495 (4.317)		
REG (Nord-West)	-1.872 (4.286)		
REG (Süd-West)	-2.453 (4.403)		
REFO (KG)	1.174* (0.671)		
(Konstante)	7.426 (5.452)	6.631** (2.757)	6.536** (2.677)
N	180	180	180
R2	0.161	0.131	0.153
Adjusted R2	0.127	0.116	0.134
Standardfehler	4.176 (df=172)	4.202 (df=176)	4.160 (df=175)
F-Statistik	4.716*** (df=7; 172)	8.820*** (df=3; 175)	7.896*** (df=4; 175)

*p<0,1 **p<0,05 ***p<0,01

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Folgenden werden die Regressionskoeffizienten interpretiert und die in 3.2.3.1 formulierten Hypothesen zur Standardabweichung untersucht.

Anlagevermögen

Das logarithmierte Anlagevermögen beeinflusst die Standardabweichung als Risikomaß bei einem Niveau von 5% signifikant. Der P-Wert ist in allen drei Modellen sogar geringer als 0,01. Der Zusammenhang zwischen dem logarithmierten Anlagevermögen und der Standardabweichung als Risikomaß ist negativ, sodass die Hypothese „je höher das Anlagevermögen, desto geringer das Risiko“ angenommen werden kann. Große Biogasanlagen weisen demnach ein geringeres Risiko auf als kleine Biogasanlagen.

Auch im dritten, polynomialen Modell wurde ein linearer Zusammenhang für das logarithmierte Anlagevermögen geschätzt. Die Änderungsrate der Standardabweichung als Risikomaß beträgt unabhängig von der Höhe des logarithmierten Anlagevermögens 1,22%.

Um zu beschreiben wie sich die Standardabweichung als Risikomaß in Abhängigkeit des Anlagevermögens ändert, wird das logarithmierte Anlagevermögen exponiert. Die Änderung der Standardabweichung als Risikomaß in Abhängigkeit des Anlagevermögens ist dadurch nicht linear. Sie folgt dem in Abbildung 75 dargestellten Verlauf (blau). Die Änderungsrate der Standardabweichung als Risikomaß verläuft im negativen Bereich. Sie steigt bei kleinen Biogasanlagen mit zunehmender Größe stark an. Mit zunehmendem Anlagevermögen steigt sie weniger stark und geht gegen Null. Die Änderungsrate der Standardabweichung für den Mittelwert des Anlagevermögens in Höhe von 3,9 Mio. Euro beträgt -0,038%.

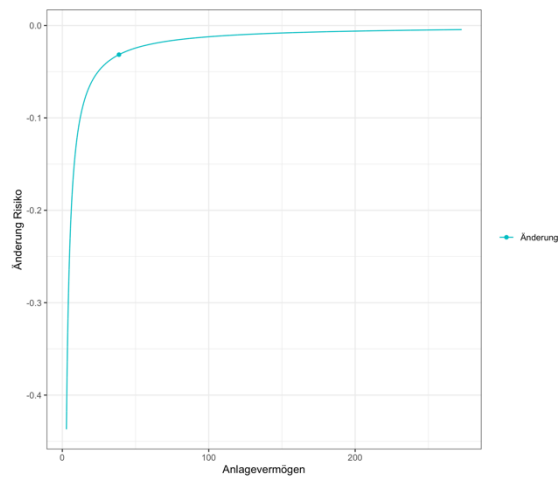


Abbildung 75: Änderung der Standardabweichung (%-Punkte) in Abhängigkeit des Anlagevermögens
Quelle: Eigene Darstellung

Eigenkapitalquote

Auch der negative Zusammenhang zwischen Eigenkapitalquote und der Standardabweichung als Risikomaß ist signifikant bei einem Niveau von 5%. Die Hypothese „je höher die Eigenkapitalquote, desto geringer das Risiko“ kann also nicht verworfen werden. Im zweiten Modell beträgt der Regressionskoeffizient unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs $-0,046\%$. Wenn die Eigenkapitalquote um 1% steigt, sinkt die Standardabweichung als Risikomaß um $0,046\%$. Oder anders ausgedrückt, wenn die Eigenkapitalquote um 10% steigt, sinkt das Risiko um $0,46\%$. Die Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs ist konstant und durch die rote Gerade in Abbildung 75 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen der Eigenkapitalquote und der Standardabweichung als Risikomaß wird jedoch noch besser durch eine quadratische Funktion beschrieben. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der beiden transformierten Variablen beträgt $0,029$ und ist damit noch deutlich kleiner als 5%.

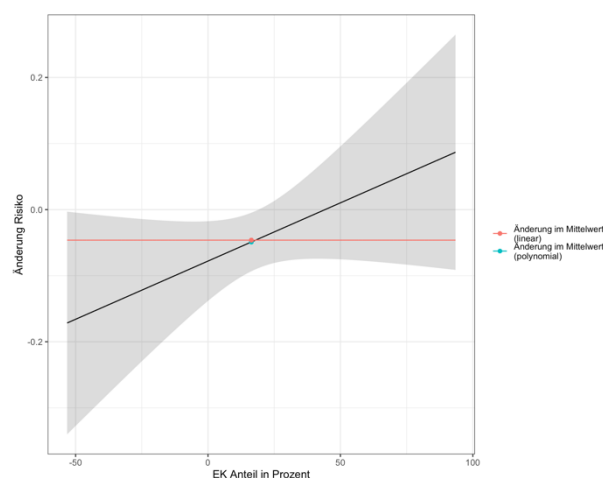


Abbildung 76: Änderung der Standardabweichung in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote
Quelle: Eigene Darstellung

Ausgehend von einem quadratischen Zusammenhang verläuft die Kurve, die die Änderungsrate in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote beschreibt, linear. Die Änderungsrate der Standardabweichung als Risikomaß steigt mit zunehmender Eigenkapitalquote. Ab einem Eigenkapitalanteil von 44,22% ist die Änderungsrate positiv. Die Änderungsrate im Mittelwert der Eigenkapitalquote in Höhe von 16,37% beträgt -0,054%. Sie liegt im negativen Bereich und entspricht fast der Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs zwischen der Eigenkapitalquote und der Standardabweichung als Risikomaß.

Alter

Der Regressionskoeffizient für das Alter der Biogasanlage hat ein positives Vorzeichen und ist signifikant bei einem Niveau von 5%. Die Hypothese „je höher das Alter, desto geringer das Risiko“ für die Standardabweichung als Riskomaß muss abgelehnt werden, da kein negativer, sondern ein positiver Zusammenhang ermittelt wurde. Der ermittelte Zusammenhang ist linear und die Änderungsrate damit konstant. Wenn das Alter der Biogasanlage um ein Jahr steigt, steigt die Standardabweichung als Risikomaß um 0,378%.

Region

Die ungerichtete Hypothese „das Risiko unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Region“ muss für die Standardabweichung als Risikomaß abgelehnt werden, da zum Signifikanzniveau von 5% kein Zusammenhang ermittelt werden konnte. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der Variablen beträgt 0,157 und damit über 0,05.

Rechtsform

Auch die Rechtsform der Projektgesellschaft hat keinen Einfluss auf die Standardabweichung als Risikomaß bei einem Signifikanzniveau von 5%. Die Hypothese „das Risiko unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Rechtsform“ muss demnach für die Standardabweichung als Risikomaß abgelehnt werden.

4.3.1.4 Erklärung des Value at Risk

Abbildung 77 zeigt den Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Value at Risk und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform als Scatterplot bzw. Boxplot. Zu erkennen ist, dass zwischen der Höhe des logarithmierten Anlagevermögens und dem Value at Risk kein Zusammenhang besteht. Die Regressionskurve verläuft horizontal zur Abszisse, auf der das logarithmierte Anlagevermögen abgetragen ist. Bereits die deskriptive Statistik der Variablen hat gezeigt, dass der Value at Risk und das Anlagevermögen nicht korrelieren.

Die Korrelation zwischen Value at Risk und der Eigenkapitalquote dagegen ist mit -0,4382 verhältnismäßig stark. Auch die grafische Analyse bestätigt den negativen Zusammenhang

zwischen den beiden Variablen, wobei die Regressionskurve einem quadratischen Verlauf folgt.

Zwischen dem Value at Risk und dem Alter der Biogasanlagen ist ein linearer, leicht positiver Zusammenhang erkennbar. Mit zunehmendem Alter der Biogasanlagen steigt der Value at Risk. Das Risiko nimmt demnach mit zunehmendem Alter der Biogasanlagen zu.

Bei den Boxplots für die nominal skalierten Variablen Region und Rechtsform stellt die gestrichelte Linie den Mittelwert dar, während die durchgängige Linie für den Median steht. Für die Regionen Bayern und Süd-West wurde ein nahezu identischer Mittelwert des Value at Risk ermittelt. Der durchschnittliche Value at Risk der Region Nord-Ost liegt leicht über dem Wert der Regionen Bayern und Süd-West, während der für die Region Nord-West leicht darunter liegt. Insgesamt überschneiden sich die Verteilungen des Value at Risk so stark, dass ein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit der Region nicht zu erkennen ist.

Der Value at Risk in Abhängigkeit von der Rechtsform der Biogasgesellschaft ist nahezu identisch. Biogasgesellschaften in der Rechtsform einer GmbH weisen im Mittel einen minimal höheren Value at Risk auf als die einer KG. Die Streuung des Value at Risk in Abhängigkeit der Rechtsform ist nahezu identisch. Die Unterschiede im Mittelwert sind so gering, dass sie wahrscheinlich im Zufall begründet und nicht signifikant sind.

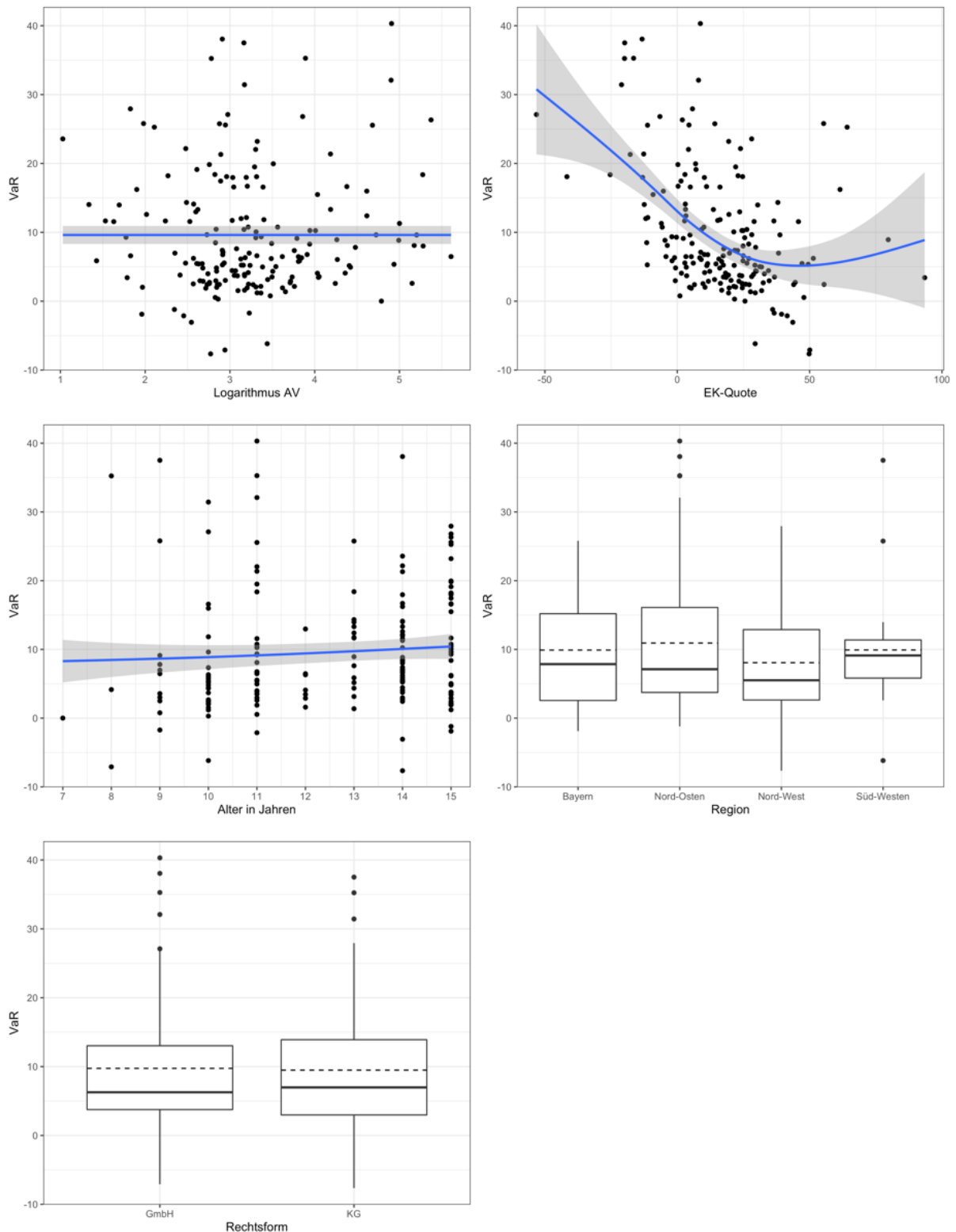


Abbildung 77: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Value at Risk und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform
Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse der Schätzung des Regressionsmodells sind in Tabelle 80 dargestellt. Modell 1 enthält wieder alle Variablen und unterstellt einen linearen Zusammenhang der Variablen. Das zweite Modell berücksichtigt nur jene Variablen, die sich als signifikant bei einem Niveau von 5% herausgestellt haben, wenn iterativ nicht signifikante Variablen aus dem ersten Modell

entfernt wurden. Im dritten Modell sind nicht nur lineare Zusammenhänge, sondern auch nichtlineare Zusammenhänge berücksichtigt.

Für alle drei Modelle zur Erklärung des Value at Risk liegen keinen einflussreichen Ausreißer vor und die Werte für den Variance Inflation Factor sprechen gegen Multikollinearität. Im dritten Modell werden ausschließlich robuste Standardfehler verwendet, da der Breusch Pagan Test ergeben hat, dass Heteroskedastizität vorliegt. Die Modelle 1 und 2 dagegen sind homoskedastisch. Die Ergebnisse des Shapiro Wilk Tests zeigen, dass die Residuen in allen drei Modellen nicht normalverteilt sind und die Hypothesentests somit nur asymptotisch valide sind. Zugunsten der Interpretierbarkeit des Modells wird dennoch von einer Box-Cox-Transformation abgesehen.

Für alle drei Modelle ist die F-Statistik zum Niveau 1% signifikant. Durch das Weglassen der nicht signifikanten Variablen sinkt die Schätzgüte des zweiten Modells im Vergleich zum ersten. Auch das adjustierte Bestimmtheitsmaß sinkt leicht, jedoch weniger stark als R^2 . Dem Ergebnis des F-Tests entsprechend kann die Hypothese „der Erklärungsgehalt von Modell 1 und Modell 2 unterscheiden sich nicht“ nicht abgelehnt werden. Die nichtsignifikanten unabhängigen Variablen (Anlagevermögen, Region und Rechtsform) haben keinen Erklärungsgehalt für die abhängige Variable Value at Risk.

Das Bestimmtheitsmaß des zweiten Modells steigt um 5%- Punkte im Vergleich zum ersten Modell. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß steigt fast im gleichem Umfang um 4,7%-Punkte. Mit diesem Regressionsmodell lassen sich 29,5% der Varianz des Value at Risk erklären. Beim F-Test liegt der P-Wert mit 0,0006 unter dem Signifikanzniveau von 5%, was bedeutet dass Modell 2 und Modell 3 sich signifikant voneinander unterscheiden. Wie bei der Rendite und der Standardabweichung verbessert die Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge die Schätzgüte des Modells.

Tabelle 80: Ergebnisstabelle der multiplen linearen Regression des Value at Risk

Abh. Variable: VaR	Modell (1)	Modell (2)	Modell (3)
log (AV)	-0.686 (0.741)		
EKQ	-0.222*** (0.030)	-0.212*** (0.029)	-0.307*** (0.059)
(EKQ)^2			0.003** (0.001)
ALT	0.712** (0.278)	0.675** (0.270)	0.609** (0.274)
REG (Nord-Ost)	7.681* (4.598)		
REG (Nord-West)	4.433 (4.612)		
REG (Süd-West)	5.016 (4.919)		
REFO (KG)	1.958 (1.267)		
(Konstante)	-0.413 (6.454)	4.528 (3.436)	5.165 (3.636)
N	180	180	180
R2	0.284	0.245	0.295
Adjusted R2	0.255	0.236	0.283
Standardfehler	7.683 (df=171)	7.776 (df=176)	7.537 (df=175)
F-Statistik	9.681*** (df=7; 171)	28.550*** (df=2; 176)	24.364*** (df=3; 175)

*p<0,1 **p<0,05 ***p<0,01

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Folgenden werden die Regressionskoeffizienten interpretiert und die in Kapitel 3.2.3.1 formulierten Hypothesen zum Value at Risk untersucht.

Anlagevermögen

Zwischen dem logarithmierten Anlagevermögen und dem Value at Risk wurde ein negativer Zusammenhang geschätzt. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht signifikant zum Niveau 5%, sodass die Hypothese „je höher das Anlagevermögen, desto geringer das Risiko“ für den Value at Risk abgelehnt werden muss.

Eigenkapitalquote

Der negative Zusammenhang zwischen Eigenkapitalquote und dem Value at Risk dagegen ist signifikant bei einem Niveau von 5%. Die Hypothese „je höher die Eigenkapitalquote, desto geringer das Risiko“ kann also für den Value at Risk angenommen werden. Im zweiten Modell beträgt der Regressionskoeffizient unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs -0,212. Wenn die Eigenkapitalquote um 1% steigt, sinkt der Value at Risk um 0,212%. Oder anders ausgedrückt: Wenn die Eigenkapitalquote um 10% steigt, sinkt der Value at Risk um 2,12%. Die Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs ist konstant und durch die rote Gerade in Abbildung 78 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen der Eigenkapitalquote und dem Value at Risk wird jedoch besser durch eine quadratische Funktion beschrieben. Die beiden transformierten Variablen der Eigenkapitalquote haben bereits einzeln bei einem Niveau von 5% einen signifikanten Einfluss auf die Rendite. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der beiden transformierten Variablen beträgt 1,62E-07 und ist damit noch deutlich kleiner als 1%.

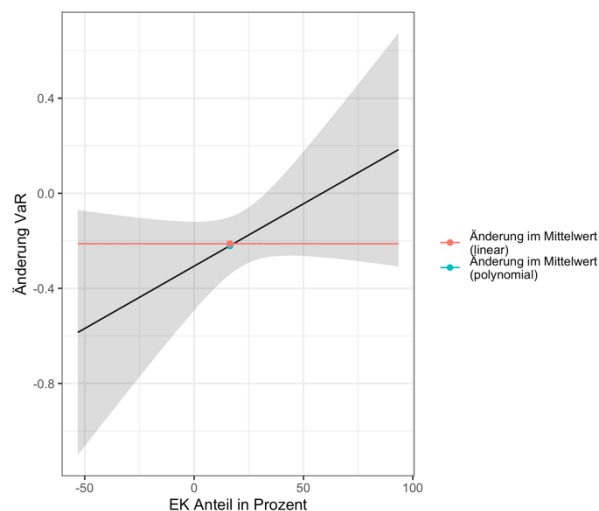


Abbildung 78: Änderung des Value at Risk in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote
Quelle: Eigene Darstellung

Ausgehend von einem quadratischen Zusammenhang verläuft die Kurve, die die Änderungsrate des Value at Risk in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote beschreibt, linear. Die

Änderungsrate der Rendite steigt mit zunehmender Eigenkapitalquote. Ab einem Eigenkapitalanteil von rund 58% ist die Änderungsrate positiv. Berücksichtigt man das Konfidenzintervall, unterscheidet sich die Änderungsrate bereits ab einer Eigenkapitalquote von rund 33% nicht mehr signifikant von null. Die Änderungsrate im Mittelwert der Eigenkapitalquote in Höhe von 16,37% beträgt -0,22%. Sie liegt im negativen Bereich und entspricht fast der Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs zwischen der Eigenkapitalquote und dem Value at Risk.

Alter

Der Regressionskoeffizient für das Alter der Biogasanlage ist positiv und zum Niveau 5% signifikant. Die Hypothese „je höher das Alter, desto geringer das Risiko“ muss für den Value at Risk abgelehnt werden, da kein negativer sondern ein positiver Zusammenhang ermittelt wurde. Es ist so, dass der Value at Risk mit zunehmendem Alter ebenfalls zunimmt. Steigt das Alter um ein Jahr, erhöht sich der Value at Risk um 0,61%.

Region

Die ungerichtete Hypothese „Der Value at Risk unterscheidet sich in Abhängigkeit der Region“ muss abgelehnt werden, da zum Signifikanzniveau von 5% kein Zusammenhang ermittelt werden konnte. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der Variablen beträgt 0,0929 und liegt damit zwar unter 10%, jedoch deutlich über dem 5%-Niveau. Bei einem signifikanten Zusammenhang bzw. Unterschied würde gelten, dass ausgehend von der Referenzregion Bayern, die Region Nord-West einen Conditional Value at Risk verzeichnet, der 3,637%-Punkte niedriger ist, während es für die Region Süd-West 2,947%-Punkte wären.

Rechtsform

Auch die Rechtsform der Projektgesellschaft beeinflusst den Value at Risk bei einem Signifikanzniveau von 5% nicht. Die Hypothese „die Rendite unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Rechtsform“ muss demnach abgelehnt werden.

4.3.1.5 Erklärung des Conditional Value at Risk

Durch den inhaltlichen bzw. rechnerischen Zusammenhang, der sich auch im hohen Korrelationskoeffizienten niederschlägt, wird die Regressionsanalyse des Conditional Value at Risk zu ähnlichen Ergebnissen führen wie die für den Value at Risk. Wie beim Value at Risk zeigt Abbildung 79 den Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Conditional Value at Risk und den unabhängigen Variablen logarithmiertes Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform als Scatterplot bzw. Boxplot. Zwischen der Höhe des logarithmierten Anlagevermögens und dem Conditional Value at Risk besteht kein Zusammenhang. Ebenfalls verläuft die Regressionskurve horizontal zur Abszisse, auf der das logarithmierte Anlagevermögen abgetragen ist. Bereits die deskriptive Statistik der Variablen hat gezeigt,

dass zwischen Conditional Value at Risk und Anlagevermögen kein Zusammenhang zu erwarten ist.

Conditional Value at Risk und Eigenkapitalquote korrelieren negativ (-0,3979). Auch die grafische Analyse bestätigt den negativen Zusammenhang zwischen den beiden Variablen, wobei die Regressionskurve einem quadratischen Verlauf folgt.

Der Zusammenhang zwischen Conditional Value at Risk und dem Alter der Biogasanlagen ist dagegen positiv und linear. Der Conditional Value at Risk steigt mit zunehmendem Alter der Biogasanlagen.

Bei den Boxplots für die nominal skalierten Variablen Region und Rechtsform stellt die gestrichelte Linie den Mittelwert dar, während die durchgängige Linie für den Median steht. Die Mittelwerte des Conditional Value at Risk bei unterschiedlichen Regionen sind nahezu identisch. Lediglich der mittlere Conditional Value at Risk der Region Nord-West liegt minimal unter denen der anderen Regionen. Die Verteilungen des Conditional Value at Risk überschneiden sich wie beim Value at Risk sehr stark, sodass kein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit der Region zu erkennen ist.

Auch bei unterschiedlichen Rechtsformen unterscheidet sich der Conditional Value at Risk kaum. Im Mittel ist der Conditional Value at Risk bei Biogasanlagen in der Rechtsform einer KG minimal höher als bei Biogasanlagen in der Rechtsform einer GmbH. Die Conditional Values at Risk der Biogasgesellschaften in der Rechtsform einer GmbH streuen etwas stärker um den Mittelwert als die einer KG.

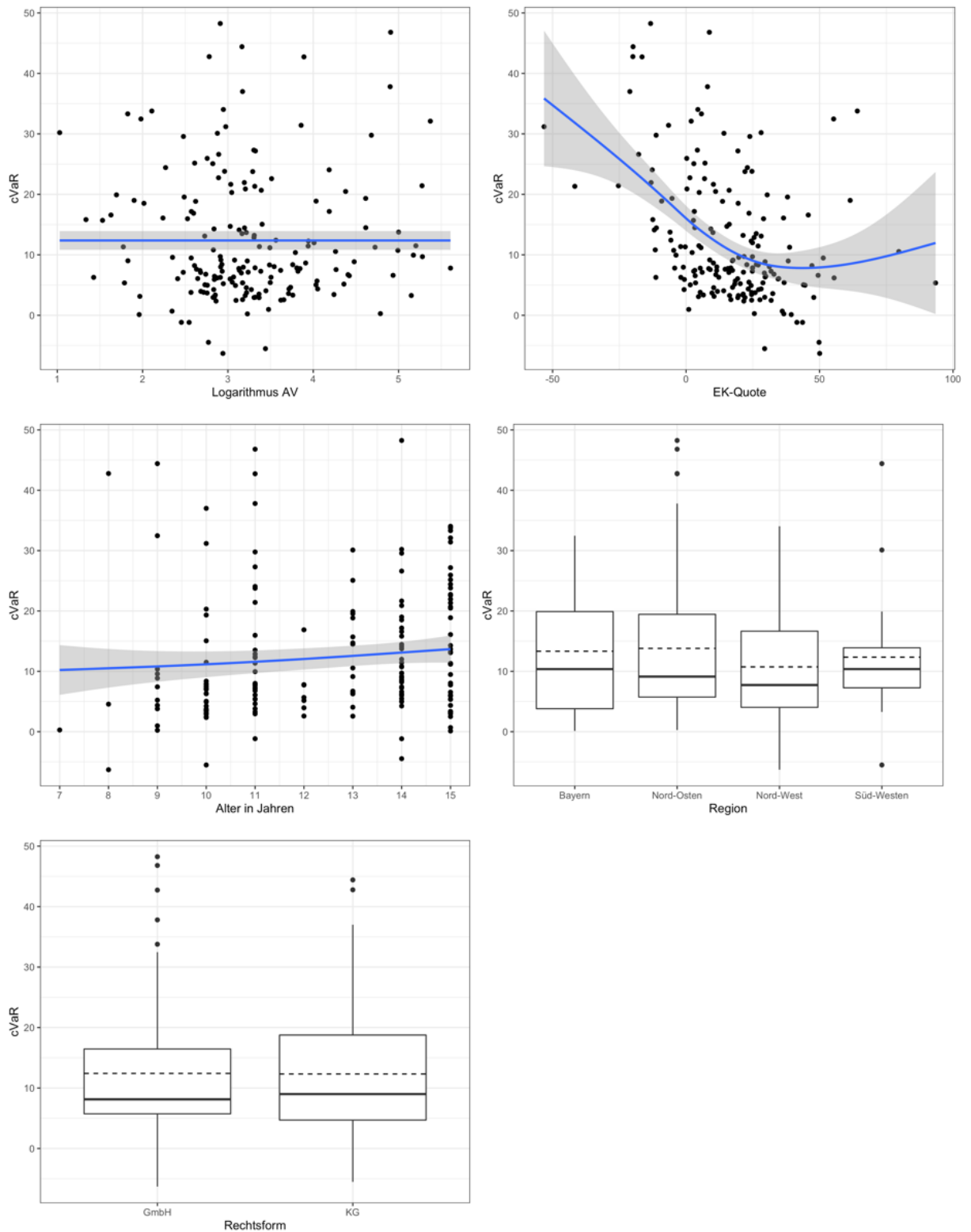


Abbildung 79: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Conditional Value at Risk und den unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote, Alter, Region und Rechtsform
 Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 81 enthält die Ergebnisse der Schätzung des Regressionsmodells. Das erste Modell berücksichtigt alle Variablen und schätzt die Regressionskoeffizienten unter Annahme eines linearen Zusammenhangs der Variablen. Das zweite Modell berücksichtigt wieder nur

Variablen, die sich bei einem Niveau von 5% als signifikant herausgestellt haben. Modell 3 berücksichtigt zusätzlich nichtlineare Zusammenhänge.

Die grafische Analyse der Cooks Distance hat ergeben, dass lediglich ein einflussreicher Ausreißer vorliegt. Somit können 179 der 180 Datenpunkte für die Erklärung der Rendite im Regressionsmodell berücksichtigt werden. Während das dritte Modell heteroskedastisch ist (P-Wert $< 0,05$), entsprechen Modell 1 und 2 der Homoskedastizitätsannahme (P-Wert $> 0,05$).

Bei allen drei Modellen sind die Residuen nicht normalverteilt und die Hypothesentests sind nur asymptotisch valide. Dennoch wird von einer Box-Cox-Transformation der abhängigen Variable zu Gunsten der Interpretierbarkeit des Modells abgesehen.

Der Variance Inflation Factor liegt für alle Variablen in allen drei Modellen unter zwei und damit unter dem Schwellenwert von zehn. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass keine Multikollinearität vorliegt.

Für alle drei Modelle ist die F-Statistik zum Niveau 1% signifikant **und** das Bestimmtheitsmaß (R^2) sinkt beim zweiten Modell wieder im Vergleich zum ersten durch das Weglassen der nicht signifikanten Variablen. Auch das adjustierte Bestimmtheitsmaß sinkt, jedoch weniger stark als R^2 . Der Erklärungsgehalt des zweiten Modells ist nahezu identisch, obwohl es weniger Variablen berücksichtigt als das erste. Die Ergebnisse des F-Tests zeigen, dass sich Modell 1 und Modell 2 nicht signifikant voneinander unterscheiden. Der P-Wert beträgt 0,0849 und liegt damit über dem Signifikanzniveau von 5%. Die Nullhypothese „der Erklärungsgehalt von Modell 1 und Modell 2 unterscheiden sich nicht“ kann also nicht abgelehnt werden. Demzufolge haben die nichtsignifikanten unabhängigen Variablen (Anlagevermögen, Region und Rechtsform) keinen Erklärungsgehalt für die abhängige Variable Conditional Value at Risk.

Mit dem dritten Regressionsmodell lassen sich 26,3% der Varianz der Rendite erklären. Das Bestimmtheitsmaß von Modell 3 liegt 4,6%-Punkte über dem des zweiten Modells. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß steigt fast im gleichem Umfang um 4,2%-Punkte. Vergleicht man die Quadratsummen der Residuen von Modell 2 und Modell 3 mit einem F-Test, zeigt das Ergebnis, dass sich diese signifikant voneinander unterscheiden. Der P-Wert beträgt 0,0011 und liegt unter dem Signifikanzniveau von 5%. Die Nullhypothese „der Erklärungsgehalt von Modell 2 und Modell 3 unterscheiden sich nicht“ kann abgelehnt werden. Dementsprechend wird die Modellgüte durch die Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge signifikant verbessert.

Tabelle 81: Ergebnisstabelle der multiplen linearen Regression des Conditional Value at Risk

Abh. Variable: CVaR	Modell (1)	Modell (2)	Modell (3)
log AV	-1.240 (0.887)		
EK-Anteil	-0.245*** (0.036)	-0.229*** (0.035)	-0.337*** (0.070)
(EK-Anteil) ²			0.003** (0.001)
Alter	0.916*** (0.333)	0.896*** (0.324)	0.821** (0.330)
Region Nord-Ost	8.923 (5.505)		
Region Nord-West	5.111 (5.521)		
Region Süd-West	5.425 (5.889)		
Rechtsform KG	2.487 (1.517)		
(Konstante)	0.804 (7.727)	4.783 (4.121)	5.509 (4.371)
N	179	179	179
R ²	0.260	0.217	0.263
Adjusted R ²	0.229	0.208	0.250
Standardfehler	9.199 (df=171)	9.325 (df=176)	9.071 (df=175)
F-Statistik	8.561*** (df=7; 171)	24.357*** (df=2; 176)	20.830*** (df=3; 175)

*p<0,1 **p<0,05 ***p<0,01

Quelle: Eigene Berechnungen

Im Folgenden werden die Regressionskoeffizienten interpretiert und die in Kapitel 3.2.3.1 formulierten Hypothesen zur Rendite untersucht.

Anlagevermögen

Zwischen dem logarithmierten Anlagevermögen und dem Conditional Value at Risk wurde ein negativer Zusammenhang geschätzt. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht signifikant zum Niveau 5%, sodass die Hypothese „je höher das Anlagevermögen, desto geringer das Risiko“ für den Conditional Value at Risk abgelehnt werden muss.

Eigenkapitalquote

Der negative Zusammenhang zwischen Eigenkapitalquote und dem Conditional Value at Risk dagegen ist signifikant bei einem Niveau von 5%. Die Hypothese „je höher die Eigenkapitalquote, desto geringer das Risiko“ kann also für den Conditional Value at Risk nicht abgelehnt werden. Im zweiten Modell beträgt der Regressionskoeffizient unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs -0,229. Wenn die Eigenkapitalquote um 1% steigt, sinkt der Conditional Value at Risk um 0,229%. Oder anders ausgedrückt: Wenn die Eigenkapitalquote um 10% steigt, sinkt das Risiko bzw. der Conditional Value at Risk um 2,29%. Die Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs ist konstant und durch die rote Gerade in Abbildung 80 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen der Eigenkapitalquote und dem Conditional Value at Risk wird jedoch besser durch eine quadratische Funktion beschrieben. Die beiden transformierten Variablen der Eigenkapitalquote haben bereits einzeln bei einem Niveau von 5% einen signifikanten Einfluss auf den Conditional Value at Risk. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der beiden transformierten Variablen beträgt 1,9162E-06 und ist damit noch deutlich kleiner als 1%.

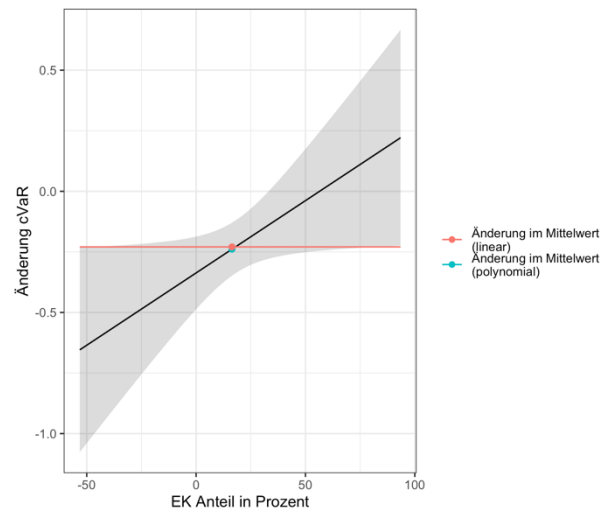


Abbildung 80: Änderung des Conditional Value at Risk in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote
Quelle: Eigene Darstellung

Ausgehend von einem quadratischen Zusammenhang verläuft die Kurve, die die Änderungsrate des Conditional Value at Risk in Abhängigkeit der Eigenkapitalquote beschreibt, linear. Die Änderungsrate des Conditional Value at Risk steigt mit zunehmender Eigenkapitalquote. Ab einem Eigenkapitalanteil von rund 56% ist die Änderungsrate negativ. Berücksichtigt man das Konfidenzintervall, unterscheidet sich die Änderungsrate bereits ab einer Eigenkapitalquote von rund 33% nicht mehr signifikant von Null. Die Änderungsrate im Mittelwert der Eigenkapitalquote in Höhe von 16,37% beträgt -0,239%. Sie liegt im negativen Bereich und entspricht fast der Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs zwischen der Eigenkapitalquote und dem Conditional Value at Risk.

Alter

Der Regressionskoeffizient für das Alter der Biogasanlage ist positiv und zum Niveau 5% signifikant. Die Hypothese „je höher das Alter, desto geringer das Risiko“ muss für den Conditional Value at Risk als Maß abgelehnt werden, da kein negativer sondern ein positiver Zusammenhang ermittelt wurde. Der Conditional Value at Risk steigt mit zunehmendem Alter der Biogasanlagen. Steigt das Alter um ein Jahr, erhöht sich der Value at Risk um 0,821% (Modell 3).

Region

Die ungerichtete Hypothese „der Conditional Value at Risk unterscheidet sich in Abhängigkeit der Region“ muss abgelehnt werden, da zum Signifikanzniveau von 5% kein Zusammenhang ermittelt werden konnte. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der Variablen beträgt 0,0855 und liegt damit zwar unter dem 10%-Niveau, jedoch deutlich über dem 5%-Niveau. Bei einem signifikanten Zusammenhang bzw. Unterschied würde gelten, dass ausgehend von der Referenzregion Bayern, die Region Nord-West einen Conditional Value at Risk verzeichnet, der 4,367%-Punkte niedriger ist, während es für die Region Süd West 3,870% sind.

Rechtsform

Auch die Rechtsform der Projektgesellschaft beeinflusst den Value at Risk bei einem Signifikanzniveau von 5% nicht. Die Hypothese „der Conditional Value at Risk unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Rechtsform“ muss demnach abgelehnt werden.

4.3.2 Erklärung der Korrelation

Bevor das Regressionsmodell geschätzt wird, werden zunächst die Variablen beschrieben. In der Tabelle 82 sind die Eigenschaften der abhängigen Variable Korrelation, sowie die der unabhängigen Variablen Differenz des Anlagevermögens, Differenz des Eigenkapitalanteils, Differenz des Alters und geografische Distanz dargestellt.

Tabelle 82: Deskriptive Statistik der abhängigen und unabhängigen Variablen

	Cor	diff_AV	diff_EK	diff_Alter	distanz
Mittelwert	0,07	37,88	0,22	2,47	278,09
St-Abw.	0,19	49,30	0,18	1,86	149,55
Min.	-0,64	0,01	0,00	0,00	0,00
25%	-0,04	7,07	0,08	1,00	165,54
Median	0,06	17,02	0,18	2,00	259,30
75%	0,18	45,45	0,31	4,00	373,79
Max.	0,69	269,99	1,47	9,00	770,66
N	15888	15888	15888	15888	15888

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Korrelation der Einzelanlagen untereinander ist im Mittel leicht positiv und liegt bei 0,07. Die Korrelationskoeffizienten liegen dabei zwischen -0,64 und 0,69. 50% der Werte liegen zwischen -0,04 und 0,18. Median und Mittelwert der Korrelationen liegen nahe beieinander, was für eine symmetrische Verteilung spricht.

Die Differenz des Anlagevermögens liegt im Mittel bei 3,78 Mio. Euro. Die Werte liegen zwischen 1.000 Euro und 27 Mio. Euro. 50% der Werte liegen zwischen 0,70 Mio. Euro und 4,52 Mio. Euro. Median und Mittelwert liegen weit auseinander. Das liegt vermutlich daran, dass der Mittelwert durch die größte Biogasanlage mit einem maximalen Anlagevermögen von 27,28 Mio. Euro stark verzerrt ist.

Die Differenz der Eigenkapitalquote liegt im Mittel bei 22%-Punkten. Die Werte liegen zwischen Null und 147%-Punkten. Werte von über 100%-Punkten kommen dadurch zustande, dass Biogasgesellschaften eine negative Eigenkapitalquote aufweisen. 50% der Werte liegen zwischen 8%- und 31%-Punkten. Median und Mittelwert liegen nahe beieinander, sodass von einer symmetrischen Verteilung ausgegangen werden kann.

Die ältesten Biogas-Gesellschaften der Stichprobe wurden 2005 gegründet. Die Altersdifferenz liegt im Mittel bei 2,47 Jahren. Die Altersdifferenz liegt zwischen null und neun Jahren. Wobei 50% der Werte zwischen ein und vier Jahren liegen.

Die Standorte der Biogasanlagen weisen im Mittelwert eine Distanz von 279 km auf. Die Distanzen liegen zwischen null und 771 km. 50% der Werte liegen zwischen 166 und 375 km. Median und Mittelwert liegen mit einer Differenz von nur 19 km nahe beieinander.

Darüber hinaus berücksichtigt das Regressionsmodell die nominal skalierten Variablen Rechtsform und Bundesland. Es wird untersucht, ob sich die Korrelationskoeffizienten signifikant unterscheiden, wenn die Biogasanlagen beide in der Rechtsform einer GmbH vorliegen, wenn beide in der Rechtsform der KG vorliegen oder wenn die Rechtsformen unterschiedlich sind. Die Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit der Rechtsform ist Tabelle 83 zu entnehmen.

Tabelle 83: Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten bei gleichen und unterschiedlichen Rechtsformen

	Mittelwert Korrelation
Beide GmbH (4306)	0,0447
Beide KG (3606)	0,1231
Unterschiedlich (7976)	0,0603

Quelle: Eigene Berechnungen

Analog zur Rechtsform wird untersucht, ob sich die Korrelationskoeffizienten unterscheiden, wenn sich die Standorte der beiden Biogasanlagen in einem Bundesland oder in unterschiedlichen Bundesländern befinden. Wieder sind die Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten der Tabelle 84 zu entnehmen.

Tabelle 84: Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten bei gleichen und unterschiedlichen Bundesländern

	Mittelwert Korrelation
Gleiches Bundesland (2187)	0,0866
Unterschiedliches Bundesland (13701)	0,0678

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 85 zeigt den Zusammenhang der Variablen in Form einer Korrelationsmatrix. Betrachtet man die Zusammenhänge zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable, ist zu erkennen, dass die Korrelationskoeffizienten, außer bei der geografischen Distanz der Anlagenstandorte, negativ sind. Der negative Zusammenhang entspricht der Erwartung und der formulierten Hypothese, dass die Korrelation umso geringer ist, je unterschiedlicher die Biogasanlagen sind. Der Korrelationskoeffizient zwischen der Korrelation und der Distanz ist zwar positiv und entspricht damit nicht den Erwartungen, jedoch ist der Wert so gering, dass voraussichtlich nicht ein positiver, sondern gar kein signifikanter Zusammenhang ermittelt wird. Der stärkste Zusammenhang ist mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,1055 zwischen der Altersdifferenz und der Korrelation zu erkennen. Die Korrelationskoeffizienten zwischen der abhängigen Variable und der Differenz im Anlagevermögen sowie der Differenz des Eigenkapitalanteils haben eine ähnliche Größenordnung.

Tabelle 85: Korrelationsmatrix der abhängigen und unabhängigen Variablen des Regressionsmodells

	Cor	diff_AV	diff_EK	diff_Alter	distanz
Cor	1,0000	-0,0868	-0,0979	-0,1055	0,0332
diff_AV	-0,0868	1,0000	0,0220	0,0160	-0,0242
diff_EK	-0,0979	0,0220	1,0000	0,0148	0,0133
diff_Alter	-0,1055	0,0160	0,0148	1,0000	0,0052
distanz	0,0332	-0,0242	0,0133	0,0052	1,0000

Quelle: Eigene Berechnungen

Neben der Korrelation zwischen den unabhängigen und der abhängigen Variablen wird die Korrelation unter den unabhängigen Variablen untersucht, um ggf. Multikollinearität aufzudecken. Die Zusammenhänge sind jedoch so schwach, dass die Gefahr von Multikollinearität als eher gering eingeschätzt werden kann. Außerdem wird im Folgenden mit dem Variance Inflation Factor überprüft, ob Multikollinearität vorliegt.

In Abbildung 81 ist der Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Korrelation und den unabhängigen Variablen Differenz des Anlagevermögens, Differenz der Eigenkapitalquote, Altersdifferenz, Rechtsform und Bundesland als Scatterplot bzw. Boxplot grafisch dargestellt. Zwischen der Differenz des Anlagevermögens und der Korrelation ist ein schwacher Zusammenhang erkennbar. Im Bereich größer null, in dem sich die meisten Datenpunkte befinden, zeigt sich ein schwach negativer Zusammenhang. Berücksichtigt man den Bereich kleiner null, der nur wenige Datenpunkte enthält, ist ein schwach positiver Zusammenhang sichtbar. Insgesamt verläuft die Regressionskurve dadurch leicht quadratisch.

Bis zu einer Differenz der Eigenkapitalquote von 40%-Punkten entspricht der Zusammenhang zwischen der Differenz der Eigenkapitalquote und der Korrelation einem negativen Verlauf. Berücksichtigt man jedoch Differenzen der Eigenkapitalquote von mehr als 40%-Punkten ist ein positiver Zusammenhang zu erkennen. Für Differenzen größer als 40%-Punkte liegen jedoch wenige Datenpunkte vor. Für die gesamte Regressionskurve kann eine quadratische Funktion zugrunde gelegt werden.

Der Zusammenhang zwischen der Altersdifferenz und der Korrelation ist quadratisch. Zunächst nimmt die Korrelation mit zunehmender Altersdifferenz der Biogasanlagen ab und ab einer Altersdifferenz von vier Jahren wieder leicht zu. In der Stichprobe kommen größere Altersdifferenzen seltener vor als kleinere.

Der Zusammenhang zwischen der geografischen Distanz der Biogasanlagenstandorte und der Korrelation ist entgegen der Erwartung leicht positiv. Die Regressionskurve verläuft nahezu linear.

Bei den Boxplots für die nominal skalierten Variablen Rechtsform und Bundesland stellt die gestrichelte Linie den Mittelwert dar, während die durchgängige Linie für den Median steht. Der Mittelwert der Korrelationen ist etwas höher, wenn beide Biogasgesellschaften die Rechtsform einer KG aufweisen. Wenn beide Biogasanlagen die Rechtsform einer GmbH aufweisen,

oder unterschiedliche Rechtsformen haben, unterscheiden sich die Mittelwerte der Korrelationen nicht. Insgesamt überschneiden sich die Verteilungen der Korrelationen so stark, dass ein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit der Rechtsform nicht zu erwarten ist.

Auch eine Unterschiedlichkeit der Korrelationen in Abhängigkeit davon, ob sich die Biogasanlagen im selben oder in unterschiedlichen Bundesländern befinden, ist nicht zu erkennen. Insgesamt überschneiden sich die Verteilungen der Korrelationen so stark, dass ein signifikanter Unterschied in Abhängigkeit der Bundesländer nicht zu erwarten ist.

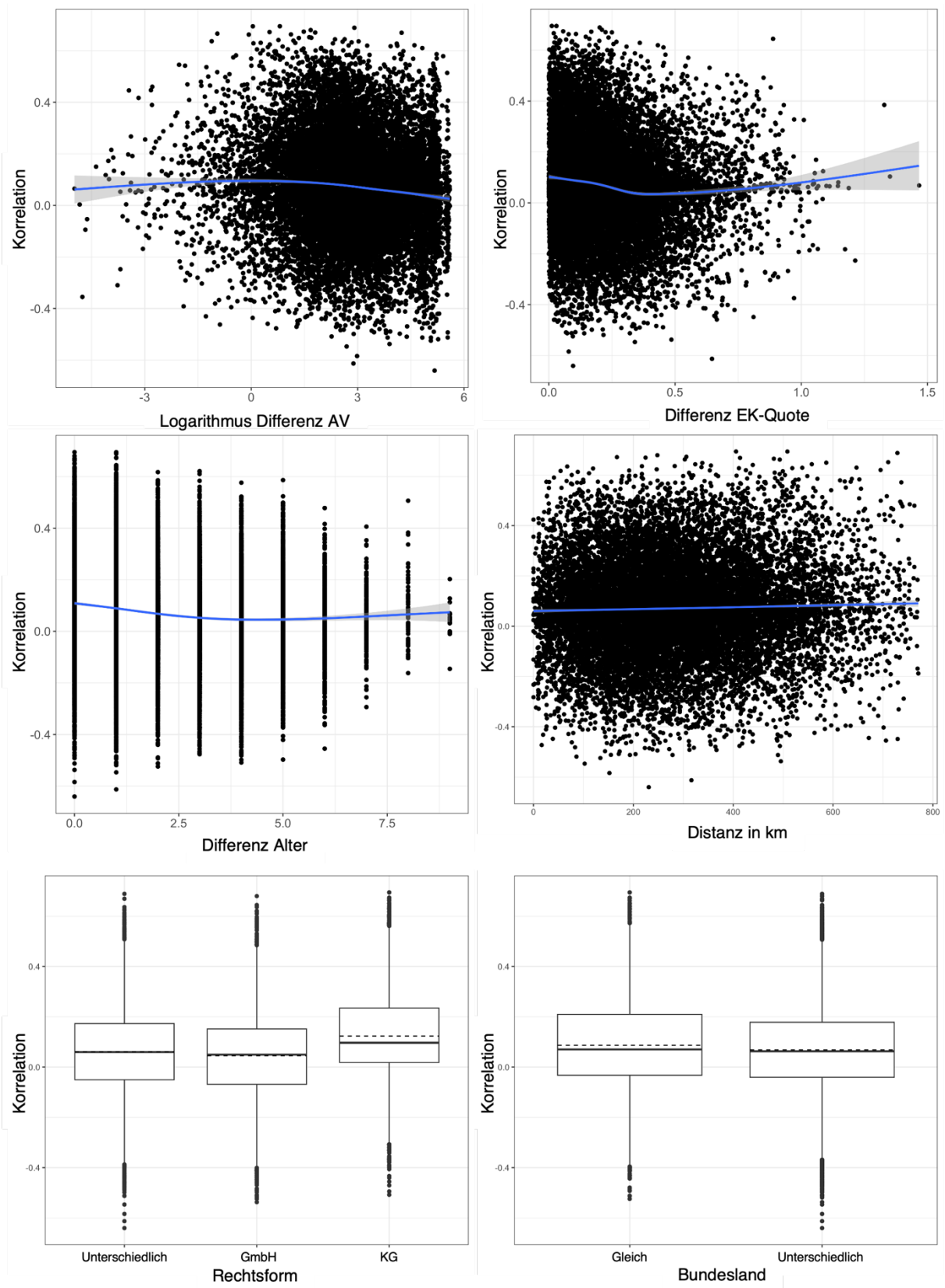


Abbildung 81: Zusammenhang zwischen der abhängigen Variable Korrelation und den unabhängigen Variablen Differenz Anlagevermögen, Differenz Eigenkapitalquote, Differenz Alter, Differenz Region und Differenz Rechtsform
 Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse der Schätzung des Regressionsmodells sind in Tabelle 86 dargestellt. Im ersten Modell werden alle Variablen berücksichtigt und die Regressionskoeffizienten unter Annahme eines linearen Zusammengangs der Variablen geschätzt. Da im ersten Modell alle Variablen zu einem Niveau von 5% signifikant sind gibt es nur zwei Modelle. Das zweite Modell berücksichtigt nicht nur lineare Zusammenhänge, sondern auch nichtlineare Zusammenhänge.

Bevor die Variablen im einzelnen betrachtet werden, soll zunächst die Güte der beiden Modelle verglichen werden. Die grafische Analyse der Cooks Distance hat ergeben, dass für beide Modelle keine einflussreichen Ausreißer vorliegen. Somit können alle Datenpunkte für die Erklärung der Korrelation im Regressionsmodell berücksichtigt werden.

Der Breusch Pagan Test hat ergeben, dass bei beiden Modellen Heteroskedastizität vorliegt (P-Wert < 0,05). Demnach werden ausschließlich robuste Standardfehler verwendet.

Die Annahme normalverteilter Residuen wurde mit dem Shapiro Wilk Test überprüft, wobei für beide Modelle die Nullhypothese abgelehnt werden muss. Die Residuen sind demnach nicht normalverteilt. Das hat zur Folge, dass die Hypothesentests nur asymptotisch valide sind. Von einer Box-Cox-Transformation der abhängigen Variable wird dennoch zu Gunsten der Interpretierbarkeit des Modells abgesehen.

Der Variance Inflation Factor liegt für alle Variablen der beiden Modelle unter dem Schwellenwert von zehn. Es kann demnach davon ausgegangen werden, dass keine Multikollinearität vorliegt. Um mit der Multikollinearität bei den Variablen Anlagevermögen und quadriertes Anlagevermögen umzugehen, wurden diese Variablen zentriert („demeaned“). Von der jeweiligen Variable wurde ihr Mittelwert abgezogen. Durch die Zentrierung entsprechen die Koeffizienten der Abweichung vom Mittelwert.

Die F-Statistik ist für beide Modelle zum Niveau 1% signifikant. Das Bestimmtheitsmaß (R^2) steigt beim zweiten Modell leicht im Vergleich zum ersten Modell durch die Berücksichtigung nichtlinearer Zusammenhänge. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß unterscheidet sich im zweiten Modell nicht vom Bestimmtheitsmaß. Mit diesem Regressionsmodell lassen sich nur 5,4% der Varianz der Korrelation erklären. Vergleicht man die Quadratsummen der Residuen von Modell 1 und Modell 2 mit einem F-Test, zeigt das Ergebnis, dass diese sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Der P-Wert beträgt 9,6667E-27, sodass bei einem Signifikanzniveau von 5% die Nullhypothese „Der Erklärungsgehalt von Modell 1 und Modell 2 unterscheiden sich nicht“ abgelehnt werden muss.

Tabelle 86: Ergebnisstabelle der multiplen linearen Regression der Korrelation

Abh. Variable: Korrelation	Modell (1)	Modell (2)
log (Δ AV)	-0.007*** (0.001)	
log (Δ AV) demeaned		-0.008*** (0.009)
(log(Δ AV) demeaned)^2		-0.001*** (0.0004)
Δ EKQ	-0.076*** (0.008)	-0.238*** (0.020)
(Δ EKQ)^2		0.235*** (0.027)
Δ ALT	-0.011*** (0.001)	-0.028*** (0.002)
(Δ ALT)^2		0.003*** (0.0003)
Δ STO	0.00003*** (0.00001)	0.00003*** (0.00001)
Δ REFO (GmbH)	-0.013*** (0.004)	-0.013*** (0.004)
Δ REFO (KG)	0.055*** (0.004)	0.054*** (0.004)
Δ REG	-0.016*** (0.005)	-0.015*** (0.004)
(Konstante)	0.131*** (0.007)	0.144*** (0.007)
N	15.888	15.888
R ²	0.047	0.055
Adjusted R ²	0.047	0.055
Standardfehler	0.184 (df=15880)	0.183 (df=15877)
F-Statistik	112.840*** (df=7; 15880)	99.460*** (df=10; 15877)

*p<0,1 **p<0,05 ***p<0,01

Quelle: Eigene Berechnungen

Im folgenden werden die Regressionskoeffizienten interpretiert und die in Kapitel 4.3.2 formulierten Hypothesen zur Korrelation untersucht.

Differenz Anlagevermögen

Die Differenz des Anlagevermögen beeinflusst die Korrelation bei einem Niveau von 5% signifikant. Der Zusammenhang zwischen der Differenz im Anlagevermögen und der Korrelation ist negativ, sodass die Hypothese „je unterschiedlicher die Biogasanlagen in der Höhe des Anlagevermögen, desto geringer die Korrelation“ angenommen werden kann.

Im ersten Modell wurde der lineare Zusammenhang für das logarithmierte Anlagevermögen geschätzt. Die Änderungsrate der Korrelation beträgt unabhängig von der Höhe der Differenz des logarithmierten Anlagevermögens -0,007. Die rote Kurve in Abbildung 82 zeigt die Änderungsrate der Rendite in Abhängigkeit des logarithmierten Anlagevermögens.

Um zu beschreiben wie sich die Korrelation in Abhängigkeit der Differenz des Anlagevermögens ändert, wird die Differenz des logarithmierten Anlagevermögens exponiert. Die Änderung der Korrelation in Abhängigkeit der Differenz des Anlagevermögens ist dadurch nicht linear. Sie folgt dem in Abbildung 82 rot dargestellten Verlauf. Zunächst steigt die Änderungsrate der Korrelation mit zunehmendem Anlagevermögen stark an. Dann nimmt die Änderungsrate ab und läuft gegen null. Die Änderungsrate der Korrelation für den Mittelwert der Differenz des Anlagevermögens in Höhe von 3,79 Mio. Euro beträgt -0,0001872.

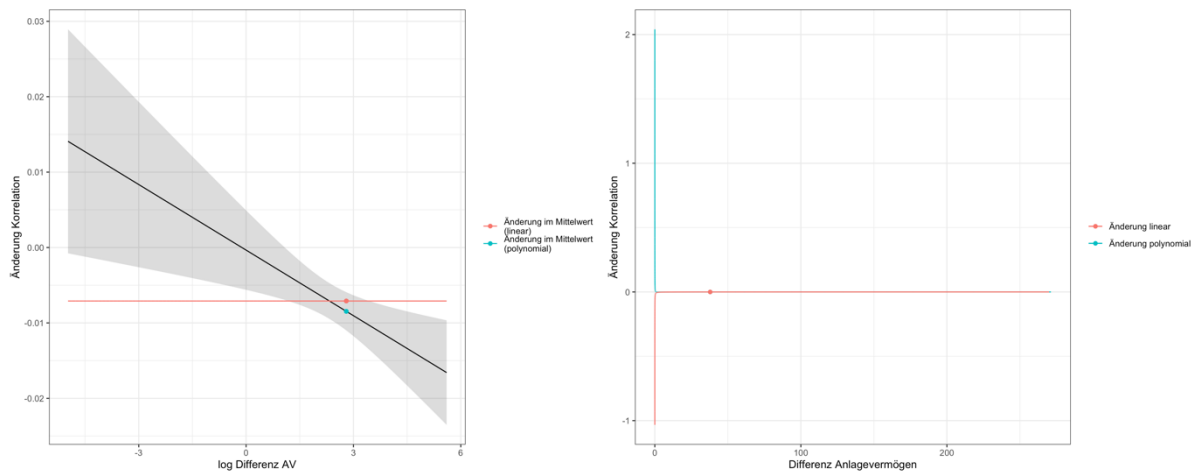


Abbildung 82: Änderung der Korrelation in Abhängigkeit der Differenz des Anlagevermögens
Quelle: Eigene Darstellung

Besser beschrieben wird der Zusammenhang zwischen dem Anlagevermögen und der Rendite jedoch durch eine quadratische Funktion (Modell 2). Die beiden transformierten Variablen des logarithmierten Anlagevermögens haben bereits einzeln bei einem Niveau von 5% einen signifikanten Einfluss auf die Rendite. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der Variablen beträgt $1,3081E-13$ und ist damit noch deutlich kleiner als 1%.

Durch Exponieren der Differenz des logarithmierten Anlagevermögens können Aussagen zur Änderungsrate der Korrelation in Abhängigkeit der Differenz des Anlagevermögens gemacht werden. Die Änderungsrate, unter Berücksichtigung des quadratischen Zusammenhangs zwischen der Differenz des Anlagevermögens und der Korrelation, ist in Abbildung 82 durch die blaue Kurve dargestellt. Die Änderungsrate der Korrelation für den Mittelwert der Differenz des Anlagevermögens in Höhe von 3,79 Mio. Euro unter Berücksichtigung des nicht linearen Zusammenhangs beträgt $-0,000287$.

Differenz Eigenkapitalquote

Auch der negative Zusammenhang zwischen der Differenz der Eigenkapitalquote und der Korrelation ist signifikant bei einem Niveau von 5%. Die Hypothese „je unterschiedlicher die Eigenkapitalquoten der Biogasanlagen, desto geringer die Korrelation“ kann also nicht verworfen werden. Im ersten Modell beträgt der Regressionskoeffizient unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs $-0,075\%$. Wenn die Differenz der Eigenkapitalquote um 1% steigt, sinkt die Korrelation um $0,075$. Oder anders ausgedrückt, wenn die Eigenkapitalquote um 10% steigt, sinkt die Korrelation um $0,75\%$. Die Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs ist konstant und durch die rote Gerade in Abbildung 83 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen der Differenz der Eigenkapitalquote und der Korrelation wird jedoch am besten durch eine quadratische Funktion beschrieben. Die beiden transformierten

Variablen der Differenz der Eigenkapitalquote haben bereits einzeln bei einem Niveau von 5% einen signifikanten Einfluss auf die Rendite. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der beiden Variablen beträgt $2,23E-34$ und ist damit noch deutlich kleiner als 1%.

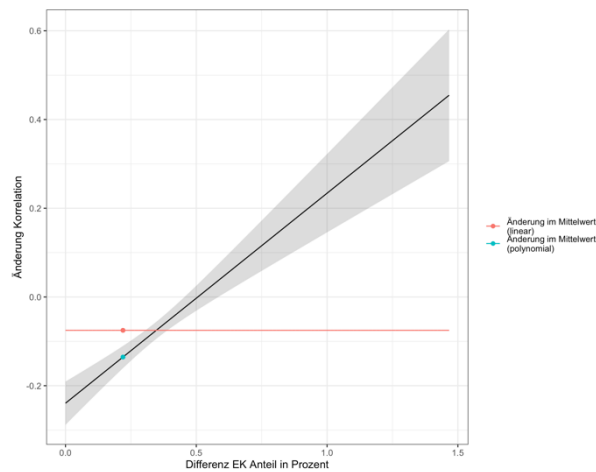


Abbildung 83: Änderung der Korrelation in Abhängigkeit der Differenz des Eigenkapitalanteils
Quelle: Eigene Darstellung

Ausgehend von einem quadratischen Zusammenhang verläuft die Kurve, die die Änderungsrate in Abhängigkeit der Differenz der Eigenkapitalquote beschreibt, linear. Die Änderungsrate der Korrelation steigt mit zunehmender Differenz der Eigenkapitalquote. Ab einer Differenz der Eigenkapitalquote in Höhe von rund 50% wird die Änderungsrate positiv. Die Änderungsrate im Mittelwert der Differenz der Eigenkapitalquote in Höhe von 21,88% beträgt -0,1354%.

Altersdifferenz

Auch der negative Zusammenhang zwischen der Altersdifferenz und der Korrelation ist signifikant bei einem Niveau von 5%. Die Hypothese „je unterschiedlicher das Alter der Biogasanlagen, desto geringer die Korrelation“ kann also nicht verworfen werden. Im ersten Modell beträgt der Regressionskoeffizient unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs -0,011%. Wenn die Altersdifferenz um ein Jahr steigt, sinkt die Korrelation um 0,011. Die Änderungsrate unter Berücksichtigung eines linearen Zusammenhangs ist konstant und durch die rote Gerade in Abbildung 84 dargestellt.

Der Zusammenhang zwischen der Altersdifferenz und der Korrelation wird jedoch am besten durch eine quadratische Funktion beschrieben. Die beiden transformierten Variablen der Differenz der Eigenkapitalquote haben bereits einzeln bei einem Niveau von 5% einen signifikanten Einfluss auf die Rendite. Der P-Wert für die gemeinsame Signifikanz der beiden Variablen beträgt $2,10E-56$ und ist damit noch deutlich kleiner als 1%.

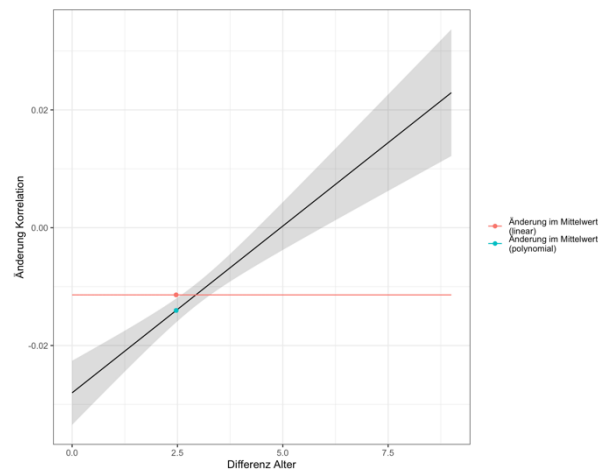


Abbildung 84: Änderung der Korrelation in Abhängigkeit der Altersdifferenz
Quelle: Eigene Darstellung

Ausgehend von einem quadratischen Zusammenhang verläuft die Kurve, die die Änderungsrate in Abhängigkeit der Altersdifferenz beschreibt, linear. Die Änderungsrate der Korrelation steigt mit zunehmender Altersdifferenz. Ab einer Altersdifferenz von rund 5 Jahren ist die Änderungsrate positiv. Die Änderungsrate im Mittelwert der Altersdifferenz in Höhe von 2,5 Jahren beträgt -0,0140%.

Geografische Distanz

Der Zusammenhang zwischen der geografische Distanz der Biogasanlagenstandorte und der Korrelation ist positiv linear und zum Niveau 5% signifikant. Die Hypothese „je größer die räumliche Distanz der Biogasanlagenstandorte, desto geringer die Korrelation“ muss demnach abgelehnt werden. Entgegen der Erwartung ist der Zusammenhang minimal positiv und nicht negativ.

Unterschiedlichkeit der Rechtsform

Gegenüber der Referenzgröße „unterschiedliche Rechtsform“ ist die Korrelation signifikant geringer, wenn beide Gesellschaften die Rechtsform der GmbH aufweisen und höher, wenn beide Gesellschaften die Rechtsform der KG aufweisen. Dennoch kann die Hypothese „bei einer unterschiedlichen Rechtsform ist die Korrelation geringer als bei gleicher Rechtsform“ nicht angenommen werden. Im Fall „beide GmbH“ ist die Korrelation geringer als bei der Referenzgröße „unterschiedliche Rechtsform“ und nicht größer.

Unterschiedlichkeit des Bundeslands

Bei der nominal skalierten Variable Region werden die Ausprägungen gleiches Bundesland und unterschiedliches Bundesland unterschieden. Die Hypothese dass die Korrelation geringer ist, wenn sich die Biogasanlagen in unterschiedlichen Bundesländern befinden, kann angenommen werden. Die Korrelation bei unterschiedlichen Bundesländern ist signifikant um 0,017 geringer als wenn sich beide Biogasanlagen im gleichen Bundesland befinden.

5 Diskussion der Ergebnisse und Fazit

5.1 Diskussion der Ergebnisse

5.1.1 Parameterschätzung

5.1.1.1 Stichprobenverteilung und Erwartungswert der Renditen

Bevor der Portfolioeffekt bei Investitionen in Biogasanlagen analysiert werden kann, müssen für die zunächst noch freien Parameter des Modells konkrete Zahlenwerte bestimmt werden. Die wichtigsten Determinanten des Modells nach Markowitz sind die Rendite, das Risiko und die Korrelation einzelner Wertpapiere.

Eine zentrale Annahme der Portfoliotheorie ist, dass Renditen von Wertpapieren normalverteilt sind. Da sie empirisch in vielen Fällen nicht haltbar ist, wird diese Annahme in Zusammenhang mit der Portfoliotheorie viel diskutiert. Der Shapiro-Wilk-Test in Kombination mit der Bonferroni-Korrektur hat gezeigt, dass bei Biogasanlagen die historischen Renditen in einer Vielzahl der Fälle normalverteilt sind. Die Renditen von nur vier der 180 Biogasanlagen sind nicht normalverteilt. Die Erwartungswerte dieser Renditen sind dennoch unverändert in das Modell eingegangen. Das kann zur Folge haben, dass die Renditen der Portfolios, in denen eine oder mehrere dieser Biogasanlagen enthalten sind, ebenfalls nicht normalverteilt sind. Die ersten beiden zentralen Momente sind dann nicht ausreichend, um die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Renditen vollständig zu beschreiben. Wird diese Tatsache ignoriert, kann es im schlechtesten Fall sein, dass die Risiken dieser Portfolios unterschätzt werden. Um diese Folge zu verhindern, hätten die Renditen der Portfolios, in denen Biogasanlagen enthalten sind, deren Renditen nicht normalverteilt sind, wiederum auf Normalverteilung getestet werden können. In den effizienten Portfolios ist lediglich eine der vier Biogasanlagen, deren Renditen nicht normalverteilt sind, enthalten (BGA16). Im Minimumvarianzportfolio ist Biogasanlage BGA16 nur mit einem Anteil von 2,05% enthalten. Es wurde darauf verzichtet die Renditen der Portfolios, in denen Biogasanlage BGA16 enthalten ist, auf Normalverteilung zu testen.

Markowitz betont, dass sich seine Arbeit nicht auf die Vorstellung über die zukünftige Entwicklung von Wertpapieren bezieht, sondern ausschließlich auf die Portfolioauswahl (Markowitz, 1952). Die Frage, wie man zu verlässlichen Prognosen kommt, lässt er offen. Dadurch stellt die Erwartungsbildung einen vielfach diskutierten und kritisierten Aspekt in Bezug auf die Portfoliotheorie dar. Denn die Qualität der Parameter beeinflusst maßgeblich die Qualität der Modellergebnisse. Im Gegensatz zu Wertpapieren liegen über die Vorhersagbarkeit der Renditen von Biogasanlagen auf Basis historischer Daten keine Forschungsergebnisse vor. Es kann also keine Aussage gemacht werden, ob der Mittelwert historischer Renditen einen guten Prognosewert darstellt.

Im Rahmen der Planung und Entwicklung von Biogas-Projekten erfolgt die Erwartungsbildung über zukünftige Renditen auf Basis von umfassenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Diese stellen zu Beginn des Projekts die Grundlage für Investitionsentscheidungen dar. Die Ertragsseite wird dabei auf Basis der Anlagenleistung und der gesetzlich geregelten Einspeisevergütung kalkuliert. Durch die im EEG geregelte garantierte Abnahme und die vorrangige Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien werden in der Regel über die gesamte Projektlaufzeit nahezu konstante Erträge angenommen. Auch die Aufwandsseite lässt sich in der Regel durch langfristige Verträge belastbar prognostizieren. Im Ergebnis sind Wirtschaftlichkeitspläne für Biogasanlagen durch sehr stabile Jahresüberschüsse über die gesamte Projektlaufzeit gekennzeichnet, die zumindest in der Planung kaum Schwankungen aufweisen. Investoren erwarten demnach stabile Renditen über die gesamte Projektlaufzeit. In verschiedenen Veröffentlichungen werden im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen Gesamtkapitalrenditen von bis zu 18,9% prognostiziert.

Die Analyse der historischen Jahresabschlussdaten der 180 Biogasanlagen der Stichprobe hat jedoch gezeigt, dass die Netto-Gesamtkapitalrendite im Mittelwert bei nur 1,22% und damit weit unter den Erwartungen von Eigen- und Fremdkapitalgebern liegt. Hinzu kommt, dass entgegen der allgemeinen Erwartung von Investoren, 36% der analysierten Einzelanlagen in der Vergangenheit im Mittel eine negative Rendite erzielt haben.

Im Zusammenhang mit der Rendite wird häufig argumentiert, dass die Vergangenheit kein guter Indikator für die Prognosen über zukünftige Werte sei. Die Analyse dieser Arbeit zeigt jedoch, dass bei Biogasanlagen, die auf Basis von Wirtschaftlichkeitsberechnungen ermittelten Renditeerwartungen in den meisten Fällen weit über den tatsächlich in der Vergangenheit realisierten Werten der Stichprobe liegen. Man kann also argumentieren, dass in diesem Fall der Mittelwert historischer Renditen von Biogasanlagen einen besseren Prognosewert für den weiteren Verlauf in der Zukunft darstellen können als die Berechnungen von Analysten und Experten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch nicht statistisch überprüft ob historisch erzielte Renditen von Biogasanlagen einen geeigneten Prognosewert für die Zukunft darstellen.

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Portfoliotheorie ist, dass für die Modellparameter konkrete Zahlenwerte bestimmt werden können. Auch wenn die in der Vergangenheit tatsächlich erzielten Gesamtkapitalrenditen nicht den häufig kommunizierten Renditeerwartungen von Investoren entsprechen, eignen sie sich dennoch, oder gerade deshalb als Grundlage für die Parameterschätzung. Die Voraussetzung der Bestimmbarkeit konkreter Zahlenwerte für den Parameter Rendite ist demnach erfüllt.

5.1.1.2 Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk als alternative Risikomaße

Im Gegensatz zur Rendite ist es in Bezug auf das Risiko weniger umstritten, dass historische Daten für die Prognose herangezogen werden. Die Renditen der in der Stichprobe enthaltenen Biogasanlagen schwanken zwischen 0,48% und 24,40%, wobei der Mittelwert bei 6,59% liegt. Obwohl die Identifikation möglicher Risiken bei der Projektentwicklung und dem Betrieb von Biogasanlagen ein zentrales Thema der Agrarökonomie darstellt, werden in der Praxis im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsberechnungen häufig stabile Renditen angenommen. Die Analyse der historischen Renditen von Biogasanlagen im Rahmen dieser Arbeit hat jedoch gezeigt, dass diese zum Teil sehr starken Schwankungen unterliegen. Letztendlich sind diese Schwankungen eine wichtige Voraussetzung dafür, dass bei Investitionen in Biogasanlagen überhaupt ein Portfolioeffekt erzielt werden kann.

Auf Basis der Parameter Erwartungswert der Netto-Gesamtkapitalrendite und deren Standardabweichung wurden die alternativen Risikomaße Value at Risk und Conditional Value at Risk für die 180 Biogasanlagen der Stichprobe geschätzt. Alle drei Risikomaße zeigen eine rechtsschiefe Häufigkeitsverteilung. Das heißt, Investitionen können mit sehr hohen Risiken verbunden sein. Die Standardabweichung berücksichtigt dabei Schwankungen in beide Richtungen, während es sich beim Value at Risk und beim Conditional Value at Risk um downside Risikomaße handelt. Der Conditional Value at Risk bewertet Risiken dabei vorsichtiger als der Value at Risk. Die Werte des Conditional Value at Risk liegen (definitionsgemäß) über den Werten des Value at Risk. Auch wenn die Beurteilung subjektiv ist, lässt der visuelle Vergleich (ohne statistischen Test) der Histogramme vermuten, dass die Differenz der Werte im linken Bereich der Verteilung geringer ist als im Bereich hoher Risiken.

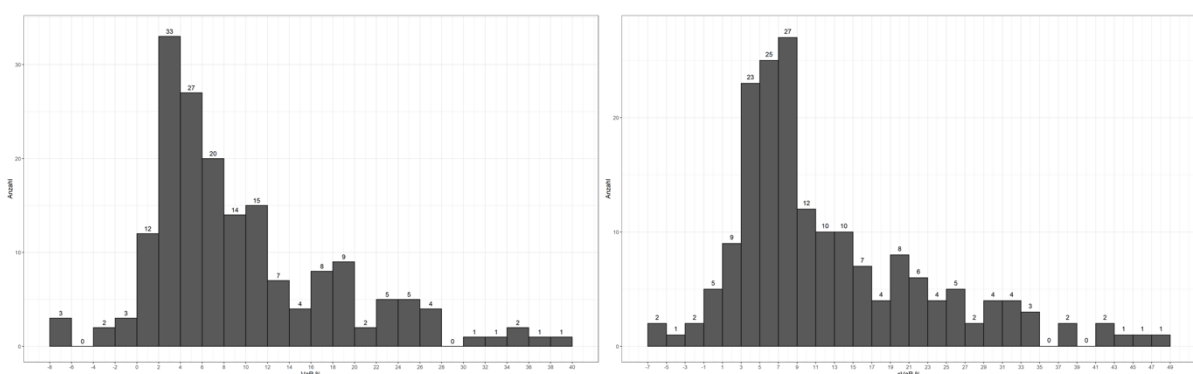


Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung des Value at Risk und des Conditional Value at Risk der Biogasanlagen im Vergleich
Quelle: Eigene Darstellung

Um das Modell anwenden zu können, müssen neben der Rendite auch für das Risiko konkrete Zahlenwerte bestimmt werden. In diesem Fall konnten neben der Standardabweichung als Risikomaß, die Risikomaße Value at Risk und Conditional Value at Risk bestimmt werden. Die

Voraussetzung der Bestimmbarkeit konkreter Zahlenwerte für den Parameter Risiko ist demnach ebenfalls erfüllt.

5.1.1.3 Kovarianz- und Korrelationsmatrix

Neben Rendite und deren Streuung, stellt die Kovarianz den dritten Parameter dar, der den Portfolioeffekt bestimmt. Die Idee der Portfoliotheorie ist es, Anlagealternativen zu kombinieren, die untereinander möglichst wenig oder sogar negativ korrelieren. Viele Handlungsempfehlungen für Investoren basieren auf der Annahme, dass die Korrelation verschiedener Anlageklassen geringer ist als die Korrelation von Wertpapieren innerhalb einer Anlageklasse. Demnach soll die Investition in verschiedene Anlageklassen das Portfoliorisiko minimieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Portfolioeffekt innerhalb einer Anlageklasse analysiert. Zu erwarten wäre demnach ein starker Zusammenhang der Renditen.

Zunächst wurden die Kovarianzen der Stichprobe geschätzt. Da eine unvollständige Datenmatrix der historischen Renditen zugrunde liegt, wurden die Kovarianzen auf Basis von Teilstichproben geschätzt. In der deskriptiven Statistik wurden, die der Schätzung zugrunde liegende Anzahl paarweiser Beobachtungen berücksichtigt. Es ist zu erkennen, dass sich die Verteilung der Kovarianzen mit zunehmender Anzahl paarweiser Beobachtungen zusammenzieht. Der Unterschied zwischen mindestens zwei und mindestens fünf paarweisen Beobachtungen ist dabei nicht so groß wie der Unterschied zwischen mindestens fünf und mindestens zehn paarweisen Beobachtungen. Mittelwert und Median der Kovarianzen steigen mit zunehmender Anzahl paarweiser Beobachtungen. Der Median ist dabei in allen drei Fällen kleiner als der Mittelwert, was auf eine rechtsschiefe Verteilung schließen lässt. Außerdem nehmen die minimalen Extremwerte stärker zu als die maximalen Extremwerte abnehmen, was die Rechtsschiefe der Verteilung mit zunehmender Anzahl paarweiser Beobachtungen verstärkt. Das heißt: bei einer größeren Teilstichprobe kommen positive Zusammenhänge häufiger vor als negative oder sehr geringe Zusammenhänge. Man kann davon ausgehen, dass die größeren (Teil-)Stichproben zu präziseren Schätzungen führen. Denn die Beobachtung positiver Zusammenhänge zwischen den Renditen der Biogasanlagen war zu erwarten, da die Analyse innerhalb einer Branche bzw. Assetklasse durchgeführt wurde. Die Kovarianzen bei einer geringen Anzahl paarweiser Beobachtungen sind vermutlich durch Schätzfehler verzerrt.

Korrelationskoeffizienten sind standardisiert und lassen sich besser interpretieren als Kovarianzen. Für eine bessere Übersicht wurden die Korrelationskoeffizienten kategorisiert. Anhand der Kategorien ist ebenfalls zu erkennen, dass der Anteil stark negativer ($-1,0 \leq p < -0,6$) und negativer ($-0,6 \leq p < -0,2$) Korrelationen mit zunehmender Anzahl an paarweisen Beobachtungen sinkt. In den Kategorien „unkorreliert“ ($-0,2 \leq p < 0,2$) und „positiv“ ($0,2 \leq p < 0,6$) korreliert steigen die Anteile mit zunehmender Anzahl paarweiser Beobachtungen, während der Anteil stark positiver ($0,6 \leq p \leq 1,0$) Korrelationen nahezu unverändert bleibt. Insgesamt ist

erwartungsgemäß der Anteil positiver Zusammenhänge höher als der Anteil negativer Zusammenhänge. Da die Korrelationskoeffizienten ausgehend von den Kovarianzen berechnet werden, sind auch hier Schätzfehler insbesondere bei kleinen Teilstichproben zu vermuten.

Um die beschriebenen Schätzfehler zu reduzieren und Investoren vor Fehlentscheidungen zu schützen, wurde das Verfahren der „Shrinkage Estimation“ angewandt. Dabei wurde das Verfahren dahingehend angepasst, dass die unterschiedlichen Größen der Teilstichproben (pairwise deletion) berücksichtigt wurden. Die „Schumpfkongstante“ δ ist abhängig von der Größe der Teilstichprobe T bzw. der Anzahl paarweiser Beobachtungen. Bei bis zu vier paarweisen Beobachtungen wird die strukturierte Matrix maximal gewichtet. In diesen Fällen nimmt δ den Wert eins an. Liegen im Gegensatz dazu viele paarweise Beobachtungen vor, wird die strukturierte Matrix weniger stark gewichtet und die Kovarianzmatrix der Stichprobe gewinnt mit zunehmender Anzahl paarweiser Beobachtungen an Bedeutung.

Bevor die „geshrinkte“ Kovarianzmatrix für die Portfoliooptimierung verwendet werden konnte, mussten weitere Anpassungen vorgenommen werden. Zunächst wurden fehlende Werte mit der Methode k -nearest neighbour imputiert. Dieser Methode liegt die Annahme zugrunde, dass die Renditen von Biogasanlagen, die ähnliche Merkmale aufweisen, auch vergleichbare Kovarianzen aufweisen. Diese Hypothese konnte jedoch in der später durchgeführten Regressionsanalyse nicht bestätigt werden. Dennoch wurde das Verfahren angewandt. Im Ergebnis entspricht die Verteilung der imputierten Kovarianzwerte im Zentrum nahezu der Originalverteilung der Stichprobenkovarianzwerte. Die Mittelwerte und Mediane weisen ähnliche Werte auf, wobei die imputierten Werte weniger stark streuen. Da bei 16.110 möglichen Kovarianzen nur 222 Werte imputiert wurden, verändert sich die Verteilung der Kovarianzmatrix kaum.

Gleiches gilt für die Anpassung, die notwendig war, um eine positiv semidefinite Kovarianzmatrix zu erhalten. Auch dadurch wird die Verteilung nur minimal verändert, wie der Vergleich in Tabelle 87 zeigt.

Tabelle 87: Anpassungen der Stichprobenkovarianzen im Vergleich

	Mittelwert	SD	Min	25%-Quantil	Median	75%-Quantil	Max	N
Stichprobenkovarianzen	0,00025	0,00255	-0,06950	-0,00048	0,00010	0,00087	0,03212	15.888
"Geschrumpfte" Kovarianzen	0,00033	0,00137	-0,01762	-0,00009	0,00014	0,00054	0,02182	15.888
"Geschrumpfte" Kovarianzen mit imputierten Werten	0,00032	0,00136	-0,01762	-0,00009	0,00014	0,00053	0,02182	16.110
Nearest positive semidefinite matrix	0,00032	0,00135	-0,01762	-0,00008	0,00013	0,00053	0,02181	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Der Vergleich der Verteilungen zeigt, dass die größte Veränderung durch die Shrinkage Estimation verursacht wurde. Der Mittelwert ist stärker gestiegen als der Median, da der Median weniger sensibel auf Ausreißer reagiert. Auch der Vergleich der Histogramme vor und nach

Anwendung der Shrinkage Estimation zeigt, dass sich die negativen Kovarianzen stärker zum Mittelwert zusammengezogen haben als die positiven. Die Verteilung ist insgesamt schmaler geworden und leicht nach rechts gerückt. Im Ergebnis entsprechen die geschrumpften Kovarianzen mehr der Erwartung eines positiven Zusammenhangs der Renditen innerhalb einer Assetklasse als die Kovarianzen der Stichprobe. Die notwendigen Anpassungen, um eine vollständige und im Ergebnis positiv semidefinite Kovarianzmatrix zu erhalten, haben die Verteilung der Kovarianzen nur minimal verändert.

Übersetzt man die Kovarianzen zur besseren Interpretierbarkeit in Korrelationskoeffizienten, ist zu erkennen, dass bereits vor Anwendung der Shrinkage Estimation über 30% der Koeffizienten der Kategorie „unkorreliert“ zugeordnet waren. Durch die Shrinkage Estimation ist nicht nur der Anteil an Extremwerten stark zurück gegangen, sondern auch der Anteil negativer und positiver Korrelationen ist zugunsten der Kategorie „unkorreliert“ zurück gegangen. Nach der Shrinkage Estimation befindet sich ein Anteil von fast 70% der Koeffizienten in der Kategorie „unkorreliert“, obwohl man innerhalb einer Assetklasse positive Korrelationen erwartet. Die Tendenz positiver Korrelationen ist dennoch klar zu erkennen: Der Anteil positiver Korrelationen war bereits vor der Shrinkage Estimation größer als der Anteil negativer Korrelationen. Durch die Shrinkage Estimation ist der Anteil positiver Korrelationen weniger stark zurück gegangen als der Anteil negativer Korrelationen. Das schränkt die Möglichkeit von starken Portfolioeffekten ein, eine Korrelation von Null schließt diese jedoch nicht aus.

Tabelle 88: Anpassungen der Korrelationen nach Kategorien im Vergleich

	stark negativ (-1,0 ≤ p < -0,6)	negativ (-0,6 ≤ p < -0,2)	unkorreliert (-0,2 ≤ p < 0,2)	positiv (0,2 ≤ p < 0,6)	stark positiv (0,6 ≤ p ≤ 1,0)	N
Stichprobe	1.310 [8,25%]	3.290 [20,71%]	4.831 [30,41%]	4.285 [26,97%]	2.172 [13,67%]	15.888
Shrinkage Estimation	1 [0,01%]	1.229 [7,74%]	11.111 [69,93%]	3.507 [22,07%]	40 [0,25%]	15.888
Imputation	1 [0,01%]	1.235 [7,67%]	11.252 [69,84%]	3.570 [22,16%]	52 [0,32%]	16.110
NPSM	2 [0,01%]	1.210 [7,51%]	11.293 [70,10%]	3.558 [22,09%]	47 [0,29%]	16.110

Quelle: Eigene Berechnungen

Um das Ergebnis der Kovarianz- bzw. Korrelationsschätzung beurteilen zu können, sollen an dieser Stelle die Argumente für negative, keine und positive Zusammenhänge der Renditen bei Biogasanlageninvestitionen diskutiert werden. Der Energieertrag einer Biogasanlage ist nach oben durch die elektrische und thermische Leistung des Blockheizkraftwerks begrenzt. Die Erlösströme von Biogasanlagen werden in der Literatur als stabil dargestellt, da die Vergütung für den produzierten Strom im EEG geregelt und für 20 Jahre fixiert ist. Erlösschwankungen beim Strom sind dadurch ausschließlich auf die Mengenkompente zurückzuführen. Auch die mögliche Vergütung für das Koppelprodukt Wärme ist in der Regel langfristig fixiert, wobei die Abnahmemengen Schwankungen unterliegen können. Ein kleiner Anteil der Biogasanlagen in der Stichprobe und auf dem Markt (Grundgesamtheit) bereiten das produzierte Biogas auf und speisen es in das Erdgasnetz ein. Die Erlöse aus dem Verkauf von Biomethan stellen in diesen Fällen den Haupterlösstrom dar, wobei Abnahmemenge und Preis in der

Regel ebenfalls langfristig fixiert sind. Die Erlösseite ist durch die langfristige Fixierung der Preise und Mengen nahezu unabhängig von Marktveränderung, was für geringe Schwankungen und eine positive Korrelation der Anlagen untereinander spricht.

Im Gegensatz zu Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen hat man es bei Biogasanlagen nicht mit fluktuierenden Energieträgern zu tun. Die Substrate für den Betrieb von Biogasanlagen sind lagerbar und ganzjährig verfügbar, sodass Biogasanlagen in der Regel unter Volllast betrieben werden können. Die Analyse der historischen Renditen hat jedoch gezeigt, dass diese stark schwanken. Das kann darauf zurückgeführt werden, dass die Biogasanlagen entgegen der Annahme, nicht unter Volllast betrieben werden oder die Aufwandsseite stärkeren Schwankungen unterliegt als angenommen. Ein weiterer Unterschied von Biogasanlagen zu Windkraft- oder Photovoltaik-Anlagen ist, dass Substrate im Gegensatz zu den Energieträgern Wind oder Sonne mit Kosten verbunden sind. In der Regel stellen die Substrate die größte Aufwandsposition im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen dar. Klimatische Bedingungen beeinflussen die Ernteerträge von z.B. Mais oder andere Getreidesorten und die verfügbaren Mengen beeinflussen wiederum die Substratpreise. Dabei spielen lokale Unterschiede in der Witterung und somit im Getreidepreis eine Rolle, die für geringe Korrelationen der Renditen von Biogasanlagen in unterschiedlichen Regionen sprechen. Gleichzeitig wird der Getreidepreis im gesamten Bundesgebiet durch das Makroklima und Weltmarktpreise beeinflusst. Den daraus resultierenden Preisschwankungen unterliegen alle Biogasanlagen, was wiederum für eine positive Korrelation der Renditen spricht.

Ein weiterer Unterschied von Biogasanlagen zu Windkraft- oder Photovoltaik-Projekten ist, dass die für den operativen Betrieb zuständigen Personen täglich vor Ort sein müssen (zum Beispiel für die Beschickung mit Substraten). Dadurch beeinflussen die Betreiberstruktur und das Management maßgeblich den wirtschaftlichen Erfolg einer Biogasanlage. Auf Einzelprojektebene gibt es große Unterschiede in der Effizienz des Anlagenbetriebs. Beispiele können Unterschiede im Einsatz und Management der Substrate oder dem Umgang mit Störungen im Anlagenbetrieb oder Wartungsintervalle sein. Die Unterschiede im Anlagenmanagement auf Einzelprojektebene sind individuell und sprechen dafür, dass kein Zusammenhang zwischen den Renditen der Biogasanlagen besteht und diese unkorreliert sind.

Aus der Analyse der Biogasanlage als Sachwertinvestition und deren Risiken lässt sich kein Argument für negative Zusammenhänge der Renditen innerhalb der Assetklasse ableiten. Es kann daraus geschlossen werden, dass die beobachteten negativen Kovarianzen bzw. Korrelationen auf zufälligen gegenläufigen Schwankungen beruhen. Wie bereits erläutert werden diese Schätzfehler durch kleine Teilstichproben begünstigt.

In diesem Zusammenhang soll an dieser Stelle noch auf die Qualität der zugrunde liegenden Daten eingegangen werden. Die unvollständige Datenmatrix der historischen Renditen der

Biogasanlagen haben die beschriebenen Anpassungen im Rahmen der Kovarianzschätzung notwendig gemacht. Es stellt sich die Frage, ob eine vollständige Datenmatrix oder eine größere Anzahl an Datenpunkten pro Biogas-Gesellschaft zu anderen oder besseren Ergebnissen geführt hätten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Jahresabschlussdaten von Biogasanlagen im Zeitraum von 2005 bis 2019 also über 15 Jahre analysiert. Man kann davon ausgehen, dass die Parameterschätzung, insbesondere der Kovarianzen, mit weniger Schätzfehlern verbunden wäre, wenn für alle Biogasanlagen Daten für die gesamten 15 Jahre verfügbar gewesen wären. Dann wären allerdings nur „alte“ Biogasanlagen, die vor 2005 in Betrieb genommen wurden, in die Analyse eingegangen und neuere Anlagen, die sich z.B. auch durch neuere Technologien auszeichnen, hätten keine Berücksichtigung gefunden. Neben der Verfügbarkeit von Jahresabschlussdaten verursacht vor allem die tatsächliche Altersstruktur der Biogasanlagen auf dem Markt die fehlenden Werte in der Datenmatrix.

Außerdem wurden im Rahmen dieser Arbeit Jahresdaten von Biogasanlagen untersucht, während bei Wertpapieren oder bei der Untersuchung des Portfolioeffekts bei Windkraftanlagen teilweise stunden- oder tageswerte herangezogen werden. Das lässt sich damit begründen, dass Winderträge oder die Kurse von börsennotierten Wertpapieren in einer höheren Frequenz schwanken. Über Betriebstagebücher hätte man auf Energieertragswerte von Biogasanlagen auf Tages- oder Monatsbasis zurückgreifen können. Diese unterliegen zum einen jedoch nur geringen Schwankungen und zum anderen wird die Wirtschaftlichkeit und damit die Rendite der Biogasanlageninvestition maßgeblich durch die Aufwandsseite beeinflusst die Monatswerte unterliegen ebenfalls leichten Schwankungen, aber ein kurzfristiger Kauf oder Verkauf von Anteilen an einer Biogas-Gesellschaft ist in der Regel nicht möglich. Da es sich bei Biogasanlagen um langfristige Investitionen handelt ist die Jahresbetrachtung der Renditen auch für Investoren geläufig.

Auch wenn die Betrachtung von wenigen Datenpunkten auf Jahresbasis und die fehlenden Werte in der Datenmatrix historischer Renditen durch die Altersstruktur von Biogasanlagen durchaus ihre Berechtigung haben, hat die Struktur der Daten zu den beschriebenen Problemen bei der Schätzung der Kovarianzmatrix geführt. Die Shrinkage Estimation hat durch das Reduzieren von Schätzfehlern dazu geführt, dass die Kovarianzen bzw. Korrelationen mehr dem erwarteten Ergebnis, die Renditen von Biogasanlagen sind unkorreliert oder weisen einen leicht positiven Zusammenhang auf, entsprechen. Darüber hinaus hat das imputieren fehlender Werte und die Ermittlung der „nearest positive semidefinite matrix“ nur einen minimalen Einfluss auf die Verteilung der Kovarianzen in der Matrix. Dennoch waren die Anpassungen notwendig um die Kovarianzmatrix als Inputparameter der Portfoliooptimierung nutzen zu können. Die Vernachlässigung von Schätzfehlern bei den Inputparametern der Portfoliooptimierung wird zum Teil in Zusammenhang mit Wertpapieren diskutiert, jedoch nicht in den Arbeiten,

bei denen der Portfolioeffekt erneuerbarer Energien untersucht wurde. Gleiches gilt für den Umgang mit fehlenden Werten und einer durch die Schätzfehler verursachten nicht positiv semidefiniten Kovarianzmatrix. An dieser Stelle könnten weitere Forschungsvorhaben ansetzen, um Investoren bei erneuerbaren Energieprojekten vor Fehlentscheidungen zu schützen.

Bereits Chaves-Schwintek (2013) hat in ihrer Arbeit betont, dass die Analyse der Korrelationen von Kapitalanlagen, die keine Wertpapiere sind, eine der größten Herausforderungen bei der Anwendung der Portfoliotheorie darstellt. Auch im Rahmen dieser Arbeit stellte die Schätzung einer vollständigen und positiv semidefiniten Kovarianzmatrix die größte Herausforderung dar. Um so mehr ist es verwunderlich, dass andere Arbeiten weder methodisch noch hinsichtlich der Schätzergebnisse auf die Kovarianzmatrix eingehen. Auf der anderen Seite können die Herausforderungen bei der Schätzung der Kovarianzmatrix auch eine Begründung darstellen, warum in anderen Arbeiten Korrelationen nicht auf Basis von Vergangenheitswerten rechnerisch ermittelt, sondern durch Analysten und Experten vorgegeben werden.

Trotz der Herausforderungen konnte im Rahmen dieser Arbeit eine vollständige und positiv semidefinite Kovarianzmatrix geschätzt werden, deren Zahlenwerte als Parameter in das Modell eingehen. Die Voraussetzung der Bestimmbarkeit konkreter Zahlenwerte für den Parameter Korrelation ist demnach ebenfalls erfüllt. Somit kann das Modell für Investitionen in Biogasanlagen angewandt werden.

5.1.2 Analyse des Portfolioeffekts

5.1.2.1 Portfolioeffekt bei Markowitz Diversifikation

Einzelanlagen im Risiko-Rendite Diagramm

Die Darstellung der 180 Einzelanlagen im Rendite-Risiko-Diagramm ermöglicht einen Überblick über das theoretische Anlageuniversum im Rahmen dieser Arbeit und stellt gleichzeitig die Ausgangssituation für die Portfoliooptimierung dar. Die beiden Dimensionen Rendite und Risiko werden im Verhältnis zueinander betrachtet. Im Allgemeinen versuchen Investoren dieses Verhältnis zu optimieren. Investoren erwarten mit zunehmendem Risiko höhere Renditen – also einen positiven Zusammenhang zwischen Risiko und Rendite. In den Rendite-Risiko-Diagrammen in 3.2.2.1 ist dieser positive Zusammenhang nicht erkennbar. Die Datenpunkte in der Rendite-Standardabweichung-Betrachtung sind trichterförmig angeordnet. Demnach können mit dem Eingehen höherer Risiken auch höhere Renditen erzielt werden, allerdings auch extrem niedrige oder negative Renditen.

Bei den Risikomaßen Value at Risk und Conditional Value at Risk sind die Datenpunkte ebenfalls eher trichterförmig angeordnet, wobei ein leicht negativer Zusammenhang vermutet werden kann: Je höher die Rendite, desto geringer der Value at Risk bzw. Conditional Value at Risk. Dieser Zusammenhang ist dadurch zu erklären, dass die Risikomaße Value at Risk und

Conditional Value at Risk isoliert betrachtet bereits die beiden Dimensionen Rendite und Standardabweichung berücksichtigen. Ceteris Paribus gilt: Je höher die Rendite, desto geringer der Value at Risk bzw. Conditional Value at Risk.

Der Mittelwert der Renditen und der Mittelwert des jeweiligen Risikomaßes unterteilt die Diagramme in vier Sektoren. Die Biogas-Gesellschaften, die sich in dem Sektor unten links befinden, sind historisch gesehen durch eine geringere Rendite aber auch durch ein geringeres Risiko als der Durchschnitt gekennzeichnet. Biogas-Gesellschaften, die sich im Sektor oben links befinden weisen eine überdurchschnittlich hohe (historische) Rendite und ein unterdurchschnittliches Risiko auf. Diese Einzelanlagen werden gemäß den Erkenntnissen der Portfoliotheorie von einem risikoaversen Investor bevorzugt. Die Biogas-Gesellschaften im Sektor oben rechts weisen eine höhere Rendite aber auch ein höheres Risiko als der Durchschnitt auf. Ein Vergleich mit dem Sektor oben links, kann dabei helfen zu entscheiden, ob das zusätzliche Risiko gerechtfertigt ist. Bei gleicher Rendite sind Einzelanlagen aus dem Sektor oben links vorzuziehen. Der Sektor unten rechts enthält die Biogas-Gesellschaften, die eine unterdurchschnittliche Rendite bei einem überdurchschnittlichen Risiko aufweisen.

Betrachtet man die drei Biogasanlagen mit der höchsten Rendite (BGA161, BGA2 und BGA125), ist zu erkennen, dass sich diese im Sektor mit überdurchschnittlichen Standardabweichungen befinden. Bei den Risikomaßen Value at Risk und Conditional Value at Risk zeigt sich ein anderes Bild. Die Biogasanlagen BGA161 und BGA2 befinden sich im Sektor oben links und sind damit mit einem unterdurchschnittlichen VaR bzw. CVaR verbunden. Die hohen Standardabweichungen der BGA161 und BGA2 werden durch die hohen Renditen kompensiert. Nur die BGA 125 befindet sich auch bei den Risikomaßen Value at Risk und Conditional Value at Risk im Sektor oben rechts.

Bei den drei Anlagen mit der geringsten Rendite (BGA118, BGA129 und BGA117) liegen zwei im Sektor überdurchschnittlicher Standardabweichungen und eine im Sektor unten links. Die niedrigen Renditen im Verhältnis zu den eher hohen Standardabweichungen führt dazu, dass die BGA bei den Risikomaßen Value at Risk und Conditional Value at Risk unten rechts eingeordnet sind.

Die Risikomaße Standardabweichung, Value at Risk und Conditional Value at Risk bewerten die Vorzüglichkeit von Anlagealternativen unterschiedlich. Da bei den Biogasanlagen dieser Untersuchung zwischen Rendite und Risiko kein positiver Zusammenhang vermutet werden kann, sollten Investoren noch mehr darauf achten, dass ein höheres Risiko auch durch höhere Renditen gerechtfertigt bzw. kompensiert wird. Die Sharpe Ratio sowie die Risikomaße Value at Risk und Conditional Value at Risk beinhalten die beiden Dimensionen Erwartungswert der Rendite und deren Standardabweichung und sind dadurch geeigneter als Grundlage für Investitionsentscheidungen bei Biogasanlagen.

Um herauszufinden, ob sich die Biogasanlagen in den vier Sektoren voneinander unterscheiden und was erfolgreiche Biogasanlagen ausmacht, werden in Kapitel 4.3 die Modellparameter im Rahmen einer Regressionsanalyse erklärt.

Risiko und Rendite effizienter Portfolios

Unabhängig vom Risikomaß kann gegenüber dem durchschnittlichen Risiko der Einzelanlage, das Risiko durch Portfoliobildung bei Investitionen in Biogasanlagen reduziert werden. Der Portfolioeffekt stellt demnach eine mögliche Erklärung für die auf dem Markt zu beobachtenden Aktivitäten von Biogasanlagen-Investoren dar. Im Gegensatz zum durchschnittlichen Risiko (SD) einer Einzelanlage in Höhe von 6,58% kann das Risiko durch Portfoliooptimierung auf 0,32% (MVP) reduziert werden. Das Risiko des MVP liegt außerdem unter dem der risikominimalen Biogasanlage, welches 0,48% beträgt. Die Risikoreduktion ist demnach nicht nur auf die Gewichtung, sondern auch auf die Korrelation der Anlagen untereinander zurückzuführen. Das Minimumvarianzportfolio ist jedoch mit einer negativen Rendite verbunden, was in der Regel nicht den Präferenzen von Investoren entspricht. Das Tangentialportfolio ist das Portfolio auf der Effizienzlinie mit dem höchsten Verhältnis von Rendite zu Risiko (SD) und ist mit einer Rendite von 8,30% und einem Risiko von 0,89% verbunden. Ein Investor muss demnach nur 0,57%-Punkte mehr Risiko in Kauf nehmen, um 8,5%-Punkte mehr Rendite zu erzielen.

Die Ergebnisse zeigen außerdem die Vorzüglichkeit eines optimierten Portfolios gegenüber naiver Diversifizierung. Im Falle der Standardabweichung als Risikomaß, liegt das Risiko des Equal Weight Portfolios bei 1,89% und das des Minimumvarianzportfolios lediglich bei 0,32%. Gegenüber den Referenzpunkten konnten Risikoreduktionen zwischen 0,82 und 9,7 %-Punkten erreicht werden.

Dunlop (2004) konnte für Windparks in Südeuropa und den USA eine Risikoreduktion von 30% durch Portfoliobildung ermitteln. Wenn sich alle Anlagen in Nordeuropa befinden, beträgt die Risikoreduktion jedoch lediglich 4%. Chaves-Schwintek (2013) hat ein Windparkportfolio mit Standorten in Deutschland mit einem, welches internationale Standorte beinhaltet, verglichen und eine Risikoreduktion von 13% ermittelt. Beide Arbeiten zeigen, dass auch innerhalb einer Assetklasse durch Diversifizierung Portfolioeffekte erzielt werden können. Gleiches gilt für Biogasanlagen – selbst wenn sich alle Anlagenstandorte in Deutschland befinden. Die relative Risikoänderung des Equal weight Portfolios bei Biogasanlagen liegt mit rund 70% deutlich über den ermittelten Risikoreduktionen bei Windportfolios. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Windportfolios der Beiträge von Dunlop und Chaves Schwintek jeweils nur 10 bzw. 9 Anlagen enthalten, während es in dieser Arbeit 180 Biogasanlagen sind, sodass stärker diversifiziert werden konnte. Darüber hinaus liegen die von Chaves-Schwintek ermittelten Korrelationskoeffizienten im Vergleich über denen von Biogasanlagen. Windparks korrelieren

durch „gemeinsame“ überregionale Wetterbedingungen stärker als Biogasanlagen, was für einen stärkeren Portfolioeffekt bei Biogasanlagen spricht.

Der Vergleich der Rendite des Minimumvarianzportfolios mit der Rendite des Portfolios, das mit dem minimalen Value at Risk verbunden ist, zeigt wie unterschiedliche Risikomaße zu unterschiedlichen Optima führen. Das Minimumvarianzportfolio ist mit einer negativen Rendite von -0,20% verbunden, während das Portfolio mit dem minimalen Value at Risk mit einer Rendite von 13,10% verbunden ist. Das liegt daran, dass bei der Berechnung des Value at Risk die Höhe der Rendite (Erwartungswert) das Ergebnis beeinflusst.

Der Vergleich der Renditen zeigt auch, dass die beiden Downside-Risikomaße zu unterschiedlichen Optima führen. Das risikominimale Portfolio beim Value at Risk ist mit einer Rendite in Höhe von 13,00% verbunden, während die Rendite beim Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk bei 11,80% liegt. Die Optima beider Downside-Risikomaße sind mit wesentlich höheren Renditen verbunden als das Minimumvarianzportfolio, bei dem die Rendite negativ ist (-0,20%). Sowohl bei der Berechnung des Value at Risk, als auch bei der Berechnung des Conditional Value at Risk, beeinflusst der Erwartungswert der Rendite das Ergebnis. Bei gegebenem Renditeniveau ist der Conditional Value at Risk höher als der Value at Risk, weil bei der Berechnung des Value at Risks, gemäß der Formel in Kapitel 3.2.1.2, die Standardabweichung stärker gewichtet wird:

$$Z_{\alpha} > \frac{\varphi(Z_{1-\alpha})}{\alpha}$$

Auch der Vergleich der Biogasanlagen mit dem minimalen Value at Risk und dem minimalen Conditional Value at Risk, in Tabelle 89, verdeutlicht den Effekt unterschiedlicher Risikomaße. Während der Value at Risk der beiden Anlagen eine vergleichbare Größenordnung aufweist, unterscheiden sich die beiden Anlagen stark bei der Standardabweichung. Die Rendite der BGA161 schwankt stärker als die der BGA145, was sich in der höheren Standardabweichung widerspiegelt. Obwohl BGA145 einen wesentlich geringeren Erwartungswert für die Rendite aufweist, ist sie der BGA161 durch die stärkere Gewichtung der (niedrigeren) Standardabweichung beim Conditional Value at Risk überlegen.

Tabelle 89: Vergleich von Value at Risk und Conditional Value at Risk der Biogasanlagen BGA161 und BGA145

	Rendite	SD	VaR	CVaR	Sharpe Ratio
BGA161	0,2014	0,0782	-0,0765	-0,0447	2,5763
BGA145	0,1017	0,0220	-0,0708	-0,0630	4,6240

Quelle: Eigene Berechnungen

Gewichtung effizienter Portfolios

Die Analyse der Portfoliogewichte hat ergeben, dass bei der Standardabweichung als Risikomaß die Portfolios entlang der Effizienzlinie aus nur 26 der verfügbaren 180 Biogasanlagen gebildet werden. Das heißt im Umkehrschluss, dass die Rendite-Risiko-Parameter der verbleibenden 154 Biogasanlagen im Vergleich unterlegen sind und eine Diversifikation diesen Nachteil in der Portfoliozusammenstellung nicht ausgleicht. Bei den Risikomaßen Value at Risk und Conditional Value at Risk sind es sogar nur 5 bzw. 6. Abbildung 57 zeigt außerdem, dass mit zunehmendem Renditeniveau die Anzahl der Einzelanlagen in den effizienten Portfolios sinkt.

Betrachtet man die Lage dieser „effizienten“ Biogasanlagen im Rendite-Risiko-Diagramm ist zu erkennen, dass es sich nicht ausschließlich um die risikominimalen Anlagen handelt. Demzufolge beruht die erzielte Risikoreduktion nicht ausschließlich auf der Gewichtung, sondern auch auf der Korrelation der Anlagen untereinander.

In den Arbeiten von Dunlop (2004), Wiese et al. (2008) und Chaves-Schwintek (2013) wurde ebenfalls der Portfolioeffekt bei Investitionen in erneuerbare Energien untersucht. Außer bei der Arbeit von Borchert & Schemm (2007) wurde jedoch keine Portfoliooptimierung durchgeführt, sondern naiv diversifizierte Portfolios verglichen. Dadurch kann die Anzahl der Einzelanlagen in den effizienten Portfolios von Biogasanlagen nicht mit anderen Technologien verglichen werden. Hinzu kommt, dass die untersuchten Stichproben der zitierten Arbeiten zum Teil bereits geringer sind als die Anzahl der Einzelanlagen in effizienten Biogasanlagenportfolios.

Empirische Arbeiten, die die Anzahl von Wertpapieren optimaler Portfolios untersuchen, kommen (im Zeitverlauf) zu unterschiedlichen Ergebnissen (vgl. Evans & Archer, 1968; Statman, 1987; Campbell et al., 2001; Statman, 2004). In der Literatur wird im Minimum eine Anzahl von acht bis 15 Einzelanlagen genannt, die zur optimalen Diversifikation notwendig sind. Bei Biogasanlagen sind im Minimumvarianzportfolio 15, im Portfolio mit der minimalen Value at Risk nur fünf und beim Conditional Value at Risk nur sechs Anlagen enthalten.

Kovarianzen effizienter Portfolios

Grundsätzlich gilt, je geringer die Korrelation unter den Einzelanlagen im Portfolio, desto größer ist der Diversifikationseffekt. Deshalb wurden die Kovarianzen in den risikominimalen Portfolios analysiert. Im Vergleich, ohne dass ein statistischer Test durchgeführt wurde, weisen die Kovarianzen in den risikominimalen Portfolios im Mittel geringere Kovarianzen auf als die Stichprobe. Beim Minimumvarianzportfolio fällt auf, dass die Biogasanlage BGA135 mit einem Großteil der übrigen Biogasanlagen im Portfolio negativ kovariiert. Dennoch ist es nicht die am stärksten gewichtete Anlage. Am stärksten gewichtet ist Biogasanlage BGA147, welche ebenfalls durch geringe Kovarianzen mit den übrigen Anlagen im Minimumvarianzportfolio auffällt. Bei dieser Anlage handelt es sich aber auch um die risikominimalste Einzelanlage der

Stichprobe. Hier zeigt sich nochmal die Bedeutung der gewichteten Risiken der Einzelanlagen für die Risikoreduktion im Portfolio.

Die Kovarianzen im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio sind im Mittel noch geringer als die im Minimumvarianzportfolio und das obwohl bei der Sharpe Ratio die Dimension Risiko nicht isoliert betrachtet wird, sondern das Verhältnis von Risiko zu Rendite. Im Portfolio mit der maximalen Sharpe Ratio ist nicht die Anlage mit der höchsten Sharpe Ratio (BGA89) am stärksten gewichtet, sondern Anlage BGA145, welche sich auf Rang zwei der Stichprobe befindet. Im Mittel kovariiert die Biogasanlage BGA145 weniger stark mit den übrigen Anlagen im Portfolio als die Biogasanlage BGA89, was einen Erklärungsansatz für die stärkere Gewichtung darstellen kann.

Der Value at Risk sowie der Conditional Value at Risk werden ebenfalls neben der Standardabweichung durch die Rendite beeinflusst. Sowohl in dem Portfolio mit dem geringsten Value at Risk als auch mit dem geringsten Conditional Value at Risk ist Biogasanlage BGA 145 am stärksten gewichtet. In beiden Fällen ist BGA 161 am zweitstärksten gewichtet. Die Biogasanlage BGA 161 weist isoliert betrachtet den geringsten Value at Risk auf und BGA 145 liegt auf Rang zwei. Gleichzeitig handelt es sich bei BGA145 um die Anlage mit dem geringsten Conditional Value at Risk, während BGA 161 auf Rang drei liegt. Die Biogasanlage BGA 145 weist im Vergleich zu Biogasanlage BGA 161 im Mittel eine geringere Kovarianz mit den weiteren Anlagen im Portfolio auf, womit sich die stärkere Gewichtung im Portfolio mit dem minimalen Value at Risk erklären lässt. Im Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk ist die Einzelanlage mit dem geringsten Conditional Value at Risk (BGA145) am stärksten gewichtet. Die Biogasanlage BGA89, welche über einen sehr geringen Value at Risk (Rang drei) und Conditional Value at Risk (Rang zwei) verfügt ist, in keinem der beiden optimierten Portfolios enthalten. Ein möglicher Grund ist, dass die Anlage BGA89 mit den übrigen Anlagen im Portfolio stärker kovariiert.

5.1.2.2 Portfolioeffekt bei naiver Diversifikation

Im Gegensatz zur Markowitz-Optimierung hat die naive Diversifikation einen höheren Praxisbezug, da die Annahmen der beliebigen Teilbarkeit und Verfügbarkeit bzw. Handelbarkeit der Einzelanlagen nicht erfüllt sein müssen. Gleichzeitig kann ein Portfolioeffekt durch naive Diversifikation Erklärungsansatz für das auf dem Markt zu beobachtende Konsolidierungsverhalten darstellen. Die Risikoreduktion in Abhängigkeit von der Portfoliogröße hat gezeigt, dass unabhängig vom Risikomaß bereits 15-20 Einzelanlagen ausreichen, um ein Großteil des Risikos zu diversifizieren.

Erwartungsgemäß sinkt die Standardabweichung als Risikomaß im Mittel mit zunehmender Portfoliogröße. Das Minimumvarianzportfolio weist ein Risiko von lediglich 0,32% auf und beinhaltet 13 Biogasanlagen mit einem Anteil von mehr als 1%. Bei naiver Diversifikation und

einer Portfoliogröße von 10 Biogasanlagen liegt das Risiko im Mittel bei 2,95% und im Minimum bei 1,19%. Die Standardabweichung als Risikomaß kann durch naive Diversifikation deutlich reduziert werden. Die Risikoreduktion erreicht jedoch bei weitem nicht das Niveau des Minimumvarianzportfolios. In 75% der untersuchten Fälle führt die zusätzliche Investition zu einer Risikoreduktion bzw. zumindest zu keiner Steigerung des Risikos.

Die Analyse, ob die Risikoänderung auf die Gewichtung bzw. Durchschnittsbildung oder die Kovarianz zurückzuführen ist, hat gezeigt, dass die Ursache des Effekts abhängig von der Portfoliogröße ist. Mit zunehmender Portfoliogröße nimmt die Bedeutung der Gewichtung ab und die Bedeutung der Kovarianz für die Gesamtrisikowandelung zu. Ab einer Portfoliogröße von 20 und mehr Biogasanlagen überwiegt der Effekt der Kovarianz. Das heißt für Investoren kann es bei der Bildung von kleineren Portfolios ausreichend sein, das Risiko der jeweiligen Einzelanlagen zu berücksichtigen. Erst bei der Bildung größerer Portfolios sollten zusätzlich die Kovarianzen bzw. Korrelationen der Renditen der Biogasanlagen im Portfolio berücksichtigt werden. Auch wenn das Risiko durch die Kovarianz nicht weiter gesenkt werden kann, sollten Investoren darauf achten, dass die Renditen der Biogasanlagen im Portfolio nicht zu stark korrelieren um das Risiko nicht zu erhöhen.

Da ein Großteil der Risikoreduzierung auf die Gewichtung der Risiken der Einzelanlagen zurückzuführen ist, ist die Wahrscheinlichkeit einer Risikoreduktion analog zur Rendite von der Höhe des Risikos des Bestandsportfolios abhängig. Im Gegensatz zur Rendite sinkt das Portfolio mit zunehmender Portfoliogröße bei abnehmendem Grenznutzen. Ähnlich wie bei Wertpapieren, wird bei einer Portfoliogröße von 10 Biogasanlagen bereits ein Großteil des Risiko-diversifikationspotenzial ausgeschöpft. Während das Equal-Weight-Portfolio ein Risiko von 1,89% aufweist, liegt es bei 10 Einzelanlagen im Portfolio im Mittel bei 2,95% und bei 20 Einzelanlagen lediglich bei 2,46%. Da sich die Risikoreduktion im Verhältnis zur Portfoliogröße nicht linear verhält, ist die Risikoreduktion von 5 auf 10 Biogasanlagen stärker als die von 10 auf 20 Biogasanlagen.

Auch Value at Risk und Conditional Value at Risk sinken erwartungsgemäß mit zunehmender Portfoliogröße. Das Portfolio mit dem minimalen Value at Risk beinhaltet nur 5 Biogasanlagen. Der Value at Risk dieses Portfolios liegt bei -8,86%. Die naive Diversifizierung führt bei gleicher Portfoliogröße zu einem Value at Risk von -5,07%. Das entspricht nahezu dem Value at Risk von Punkt E' in Abbildung 54, der einen Wert von -5,99% aufweist und das Portfolio mit dem minimalen Value at Risk ohne Berücksichtigung des Portfolioeffekts (Annahme perfekter Korrelation) beschreibt.

Das Portfolio mit dem minimalen Conditional Value at Risk beinhaltet sechs Biogasanlagen und weist einen Wert von -7,98%. Die gleiche Portfoliogröße führt bei naiver Diversifizierung

zu einen durchschnittlichen Conditional Value at Risk von -6,13% und liegt deutlich näher an dem Wert des Portfolios mit dem minimalen Conditional Value at Risk als beim Value at Risk.

5.1.2.3 Systematisches und unsystematisches Risiko der Biogasanlageninvestition

Dunlop (2004) hat die Anwendbarkeit des Capital Asset Pricing Model für Investitionen in Windparks nachgewiesen und schlussfolgert, dass der Betafaktor ein geeignetes Maß für das Produktionsrisiko darstellt. Die von ihm ermittelten Betafaktoren von 22 Windparks in Europa sind alle positiv und liegen zwischen 0,0 und 1,6. Die Betafaktoren der 180 Biogasanlagen haben eine größere Spannweite und liegen zwischen -1,29 und 5,98. Nicht nur die Spannweite der Betafaktoren von Biogasanlagen ist größer. Im Gegensatz zu den Betafaktoren der Windparks nehmen die Betafaktoren der Biogasanlagen auch negative Werte an. Das heißt, die Renditeentwicklung einzelner Biogasanlagen ist gegenläufig zu der des Marktindex. Die Biogasanlagen korrelieren weniger stark als die Windparks der Untersuchung von Dunlop. Dunlop (2004) erklärt die teilweise starke Korrelation der Windparks untereinander mit den vorherrschenden Windmustern und wiederkehrend stärkeren Windaufkommen im 4. und 1. Quartal sowie schwachen Windaufkommen im 2. und 3. Quartal eines jeden Jahres.

Die Korrelationen der Biogasanlagen sind wesentlich geringer als die der Windparks bei Dunlop. Da Biogasanlagen unabhängig von fluktuierenden Energieträgern sind, ist ein Großteil der Ergebnisschwankungen auf das Anlagenmanagement zurückzuführen. Da der Preis für die erzeugte Energie durch das EEG oder langfristige Verträge in der Regel fixiert ist, sind die Ursachen für Schwankungen auf der Kostenseite zu vermuten. Der Haupttreiber auf der Kostenseite sind die Substratkosten, welche wiederum von Ernteerträgen und entsprechenden Getreidepreisen abhängig sind. Überregionale Getreidepreise scheinen keinen starken Einfluss auf die Korrelation der Anlagen zu haben. Der systematische Anteil des Risikos der Biogasanlagen liegt im Mittel bei nur 10,8%. Im Umkehrschluss können fast 90% des Gesamtrisikos diversifiziert werden. Bei den Windparks überwiegt dagegen der systematische Anteil des Risikos und liegt bei einem Mittelwert von 71,7% (Minimum 7,7; Maximum 97,4) und damit deutlich über dem systematischen Anteil der Risiken von Biogasanlagen. Das Risiko der Biogasanlagen ist demnach weitestgehend unabhängig vom Markt und entspricht der weitläufigen Meinung, dass der Erfolg einer Biogasanlage stark vom Management und den handelnden Personen abhängig ist.

5.1.3 Erklärung der Modellparameter

5.1.3.1 Erklärung von Rendite und Risiko

Von den Modellparametern lässt sich die Rendite mit einem adjustierten Bestimmtheitsmaß von 0,486 durch die unabhängigen Variablen Anlagevermögen und Eigenkapitalanteil am besten erklären. Obwohl in der Literatur größeren Biogasanlagen eine bessere Wirtschaftlichkeit

zugesprochen wird (Döhler et al., 2016, S. 152 ff.), besteht kein positiver Zusammenhang zwischen Anlagevermögen und Rendite. Im Gegenteil, der Zusammenhang ist negativ. Das heißt, die Rendite sinkt mit zunehmendem Anlagevermögen. Kleinere Biogasanlagen erzielen dementsprechend höhere Renditen als große. Daraus ergibt sich ein weiterer Grund (neben dem Portfolioeffekt) für Investoren ein Budget in mehrere kleine Anlagen zu allokalieren, statt in eine große Biogasanlage zu investieren. Eine mögliche Ursache für den negativen Zusammenhang zwischen Anlagevermögen und Rendite, könnte in einer geringeren Komplexität kleinerer Biogasanlagen zu finden sein. Außerdem ist es möglich, dass eine kleine Biogasanlage Teil eines landwirtschaftlichen Portfolios ist und Lohn- oder Substratkosten im Jahresabschluss nicht einem marktvergleich entsprechend berücksichtigt sind, was wiederum zu einer höheren Rendite führen kann.

Darüber hinaus besteht ein positiver Zusammenhang zwischen Eigenkapitalquote und Rendite, was zu erwarten war. Die höhere Eigenkapitalquote führt zum einen zu geringeren Zinsbelastungen und hat zum anderen eine höhere Motivation der investierten handelnden Personen zur Folge.

Der Erklärungsgehalt der Standardabweichung als Risikomaß ist deutlich geringer als bei der Rendite. Das adjustierte Bestimmtheitsmaß liegt lediglich bei 0,134. Wobei die Höhe der Standardabweichung durch die unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote und Alter beeinflusst wird. Der erwartete negative Zusammenhang zwischen Höhe der Standardabweichung und der Höhe des Anlagevermögens bzw. der Eigenkapitalquote konnte bestätigt werden. Große Anlagen sind demnach durch ein geringeres Risiko gekennzeichnet als kleine. Ebenso führt eine höhere Eigenkapitalquote zu einem geringeren Risiko. Der negative Zusammenhang zwischen Höhe der Standardabweichung und des Alters der Biogasanlage konnte nicht bestätigt werden. Ältere Biogasanlagen sind mit einem höheren Risiko verbunden als jüngere. Einen negativen Zusammenhang hätte man mit Lerneffekten begründen können. Für den beobachteten positiven Zusammenhang sprechen eine „altersbedingt“ geringere Auslastung, ggf. nachträglich notwendige Investitionen, eine veraltete Technologie oder höhere Wartungskosten der Biogasanlagen.

Das adjustierte Bestimmtheitsmaß zur Erklärung der Variablen Value at Risk und Conditional Value at Risk liegt bei 0,283 bzw. 0,250. In beiden Modellen tragen die unabhängigen Variablen Eigenkapitalquote und Alter signifikant zur Erklärung der abhängigen Variablen bei. Wie bei der Standardabweichung gilt auch für die Risikomaße Value at Risk bzw. Conditional Value at Risk: Je höher die Eigenkapitalquote, desto geringer das Risiko. Ebenfalls analog zur Standardabweichung als Risikomaß weisen ältere Biogasanlagen, entgegen der Erwartung, einen höheren Value at Risk bzw. Conditional Value at Risk auf.

Der Erklärungsgehalt aller vorgestellten Regressionsmodelle liegt unter 50% und bei der Standardabweichung sogar unter 15%. Aus den Ergebnissen ist zu interpretieren, dass die gewählten unabhängigen Variablen nur bedingt in der Lage sind, die Modellparameter zu erklären. Der höchste Erklärungsgehalt wurde für die Rendite erzielt. Der Erklärungsgehalt der Standardabweichung als Risikomaß ist am geringsten. Da die Regressionsanalyse ebenfalls auf Basis, der im Bundesanzeiger veröffentlichten Jahresabschlussdaten basiert, war die Wahl der unabhängigen Variablen entsprechend eingeschränkt. Eine über die Jahresabschlussdaten hinaus gehende Erhebung und Berücksichtigung von Daten bzgl. Technologie, Anlagengröße (installierte Leistung), Substrateinsatz, Management etc. hätte voraussichtlich zu einem höheren Erklärungsgehalt der Variablen geführt. Um konkrete Handlungsempfehlungen für Investoren ableiten zu können, besteht an dieser Stelle weiterer Forschungsbedarf.

5.1.3.2 Erklärung der Korrelation

Ein weiteres Regressionsmodell dient zur Erklärung der Korrelation der Biogasanlagen untereinander. Es wird angenommen, dass die Korrelation umso geringer ist, je unterschiedlicher die Biogasanlagen sind. Es wird demnach erwartet: je größere die Differenz der Variablen zweier Biogasanlage, desto geringer die Korrelation. Auch wenn alle berücksichtigten unabhängigen Variablen signifikant zur Erklärung der Korrelation beitragen, beträgt das adjustierte Bestimmtheitsmaß des Modells lediglich 0,054. Es können also nur 5,4% der Streuung durch die vorliegenden unabhängigen Variablen erklärt werden.

Die Analyse hat gezeigt, dass Biogasanlagen durch die geringe Korrelation untereinander kaum systematischem Risiko ausgesetzt sind. Im Umkehrschluss kann die Unabhängigkeit der Biogasanlagen untereinander eine Begründung dafür darstellen, dass sich die Korrelation nur eingeschränkt durch die verwendeten Variablen erklären lässt.

Wie bei den Regressionsmodellen zur Erklärung der Modellparameter Rendite, Risiko und Sharpe Ratio gilt auch beim Regressionsmodell zur Erklärung der Korrelation, dass dieses auf einer eingeschränkten Datenbasis beruht. Es konnten lediglich unabhängige Variablen berücksichtigt werden, die auf den Jahresabschlussdaten der Biogas-Gesellschaften beruhen. Eine darüber hinaus gehende Erhebung und Berücksichtigung von Eigenschaften der Biogasanlagen hätte die Qualität des Modells erhöhen können. Auch an dieser Stelle können weitere Forschungsarbeiten ansetzen.

5.2 Fazit

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist die Beobachtung, dass der Markt für Biogasanlagen Konsolidierungstendenzen erkennen lässt. Es gibt zunehmend Investoren, die mehrere Biogasanlagen betreiben und ihr Portfolio weiterhin ausbauen, also ein diversifiziertes Portfolio gegenüber der Einzelanlage bevorzugen. Bei Wertpapieren ist die Portfoliobildung gängige Praxis und

lässt sich durch den Diversifikationseffekt erklären. Die Portfoliotheorie kann einen Erklärungsansatz für die auf dem Markt für Biogasanlagen zu beobachtende Portfoliobildung darstellen, wenn durch Diversifizierung das Risiko-Rendite-Verhältnis positiv beeinflusst wird.

Um sich der Antwort auf die Forschungsfrage „*Wie und in welchem Umfang können Investoren durch Anwendung der Portfoliotheorie das Risiko-Rendite-Verhältnis bei Investitionen in Biogasanlagen positiv beeinflussen?*“ zu nähern, wurden drei Hypothesen überprüft.

Die Portfoliotheorie, als klassischer Risikomanagementansatz für Investitionen in Wertpapiere, lässt sich auch für Investitionen in Sachanlagen wie Biogasanlagen anwenden.

Bevor ein Modell, wie das Portfolio-Selection-Modell, angewandt werden kann, muss zunächst geprüft werden, ob die Modellannahmen der Realität entsprechen. Außerdem sind für die noch freien Parameter des Modells konkrete Zahlenwerte zu bestimmen. Die restriktiven Annahmen des Portfolio-Selection-Modells, insbesondere hinsichtlich der beliebigen Teilbarkeit und hohen Fungibilität der Einzelanlagen sowie das nicht Vorhandensein von Transaktionskosten, entsprechen sowohl für Biogasanlagen als auch für andere Anlageklassen, nicht der Realität. Ein Großteil der Kritik an der Portfoliotheorie bezieht sich auf die restriktiven Annahmen und dennoch sind die Erkenntnisse der Portfoliotheorie unumstritten und haben hohe Relevanz für die Anlagepraxis. Auch wenn die Annahmen der Portfoliotheorie für Biogasanlagen nicht in allen Punkten zutreffen, kann diese dennoch angewandt werden und wertvolle Erkenntnisse liefern.

Eine weitere Voraussetzung für die Anwendung des Modells ist, dass für die freien Parameter konkrete Zahlenwerte bestimmt werden können. Im Zusammenhang mit der Portfoliotheorie handelt es sich dabei um den Erwartungswert der Rendite, das Risiko sowie die Korrelationen der Anlagen untereinander. Insbesondere für börsennotierte Wertpapiere ist diesbezüglich eine umfassende Datenbasis vorhanden und in der Regel öffentlich. Für erneuerbare Energien im Allgemeinen und für Biogasanlagen im Speziellen erweist sich der Zugang zu den notwendigen Daten deutlich schwieriger. Daher greifen viele Arbeiten in diesem Bereich auf Simulationen zurück, um der Empirie gerecht zu werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnten jedoch auf Basis der historischen Jahresabschlüsse von 180 Biogas-Gesellschaften die genannten Parameter bestimmt werden, wobei die Schätzung der Kovarianz-Matrix die größte Herausforderung darstellte.

Zusammenfassend kann die erste Hypothese nicht abgelehnt werden, da für die freien Parameter des Modells erfolgreich konkrete und plausible Zahlenwerte für Biogasanlagen bestimmt werden konnten. Es ist davon auszugehen, dass die Anwendung des Modells verwertbare Erkenntnisse liefert, wenngleich die Annahmen der Portfoliotheorie nur bedingt der Realität für Investitionen in Sachanlagen wie Biogasanlagen entsprechen. Schließlich wurde das Modell bereits für Investitionen in andere Technologien im Bereich der erneuerbaren Energien

angewandt und hat wertvolle Erkenntnisse geliefert, auch wenn die Annahmen nicht in allen Punkten erfüllt waren.

Sowohl durch Markowitz-Optimierung als auch durch naive Diversifikation lässt sich das Risiko von Investitionen in Biogasanlagen im Verhältnis zur Rendite reduzieren, wobei sich der Umfang der Risikoreduktion durch das anlagenspezifische Risiko bemessen lässt.

Die zweite Hypothese lässt sich in folgende drei Teilbereiche gliedern:

- 1) Durch Markowitz-Optimierung lässt sich das Risiko von Investitionen in Biogasanlagen im Verhältnis zur Rendite reduzieren
- 2) Durch naive Diversifizierung lässt sich das Risiko von Investitionen in Biogasanlagen im Verhältnis zur Rendite reduzieren
- 3) Der Umfang der Risikoreduktion lässt sich durch das anlagenspezifische (unsystematische) Risiko bemessen.

Durch Markowitz-Optimierung lässt sich das Risiko von Investitionen in Biogasanlagen im Verhältnis zur Rendite reduzieren

Das Portfolio-Selection-Modell dient dazu aus einem gegebenen Anlageuniversum die Einzelanlagen bzw. Portfolios auszuwählen, die bei einem gegebenen Renditeniveau das Risiko minimieren. Die Effizienzkurve ist durch das Minimumvarianzportfolio nach unten und die renditemaximale Einzelanlage nach oben begrenzt. Basierend auf den Daten der 180 Biogasanlagen in der Stichprobe, welche das Anlageuniversum darstellen, konnten effiziente Portfolios ermittelt werden. Das varianzminimale Portfolio weist eine Standardabweichung von nur 0,32% auf, während es bei der Einzelanlage mit der geringsten Standardabweichung 0,48% sind und im Durchschnitt bei einer Einzelanlage 6,59%. Durch mathematische Optimierung kann das Risiko der Einzelinvestition durch Portfoliobildung um 95% reduziert werden. Ähnliche Ergebnisse wurden für die alternativen Risikomaße Value at Risk und Conditional Value at Risk erreicht.

Die Teilhypothese kann nicht abgelehnt werden, da die ermittelten Effizienzkurven und die risikominimalen Portfolios zeigen, dass durch mathematische Optimierung das Risiko gegenüber der Einzelinvestition erheblich reduziert werden kann. Die plausiblen Ergebnisse bestätigen zum einen nochmal die grundsätzliche Anwendbarkeit des Modells und zum anderen die Hypothese, dass bei Investitionen in Biogasanlagen ein Diversifikationseffekt erzielt werden kann.

Diese hohe Risikoreduktion lässt sich nur dann realisieren, wenn die restriktiven Annahmen der Portfoliotheorie Gültigkeit besitzen und gleichzeitig Investoren über ein entsprechendes Anlageuniversum sowie eine umfangreiche Datenbasis verfügen und das Portfolio-Selection-

Modell in ihre Investitionsentscheidung zu Grunde legen. Da beides nicht zwingend der Realität entsprechen muss, Portfoliobildung aber auf dem Markt für Biogasanlagen zu beobachten ist, stellt sich die Frage, ob sich diese mit naiver Diversifikation begründen lässt, worauf die zweite Teilhypothese abzielt:

Durch naive Diversifizierung lässt sich das Risiko von Investitionen in Biogasanlagen im Verhältnis zur Rendite reduzieren

Zur Bearbeitung der zweiten Teilhypothese wurden Annahmen mit höherem Praxisbezug zu Grunde gelegt, nämlich dass der Investor bereits eine zufällig ausgewählte Einzelanlage oder ein zufällig ausgewähltes Portfolio besitzt und davon ausgehend eine weitere Biogasanlage erwirbt. Durch naive Diversifizierung lässt sich das durchschnittliche Risiko der Einzelanlage in Höhe von 6,59% auf eine Standardabweichung in Höhe von 1,89% im Equal-weight-Portfolio, in dem alle 180 Biogasanlagen enthalten sind, um rund 70% reduzieren. Die Risikoreduktion ist im Vergleich zu den optimierten Portfolios geringer. Da die Risikoreduktion im Verhältnis zur Portfoliogröße nicht linear verläuft, sind 15-20 Anlagen im Portfolio ausreichend, um das Risiko in die gleiche Größenordnung wie das Risiko des Equal-weight-Portfolios zu reduzieren.

Die Simulation hat gezeigt, dass das maximale Risiko bei Portfolios mit 10 Anlagen in jedem Fall unter dem durchschnittlichen Risiko der Einzelanlage liegt. Ausgehend von einem bestehenden, zufällig zusammen gestellten Portfolio wird unabhängig von der Portfoliogröße in 75% der Fälle das Risiko durch eine zusätzliche Investition in eine zufällig ausgewählte Anlage nicht erhöht, sondern reduziert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch naive Diversifizierung eine Risikoreduktion bei Investitionen in Biogasanlagen erzielt werden kann, so dass auch die zweite Teilhypothese nicht abgelehnt werden kann. Die Risikoreduktion ist jedoch geringer als sie durch optimierte Portfolios zu erzielen ist. Die geringere Risikoreduktion stellt den „Preis“ der realistischeren Annahmen dar.

Das Einzelrisiko einer Biogasanlage lässt sich in eine systematische und unsystematische Komponente unterteilen. Der unsystematische Teil des Risikos kann durch Diversifizierung eliminiert werden. Der systematische Anteil ist hingegen nicht diversifizierbar. Der Umfang einer Risikoreduzierung ist demnach auf das unsystematische Risiko begrenzt. Die Höhe dessen, wurde im dritten Teilbereich dieser Hypothese untersucht.

Der Umfang der Risikoreduktion lässt sich durch das anlagenspezifische (unsystematische) Risiko bemessen.

Der Betafaktor wird als Maß für das systematische Risiko einer Investition herangezogen. Die Ermittlung des Betafaktors setzt jedoch voraus, dass ein Marktportfolio existiert. Dabei handelt

es sich wiederum um ein theoretisches Konstrukt, was nicht der Realität entspricht und weder für Wertpapiere noch für erneuerbare Energien ermittelt werden kann. In der Anlagepraxis wird deshalb in der Regel auf einen Marktindex zurückgegriffen. Da für Biogasanlagen auch kein Marktindex verfügbar ist, wurde dieser auf Basis der Stichprobendaten entwickelt, so dass anschließend Betafaktoren für die 180 Biogasanlagen ermittelt werden konnten. Obwohl man innerhalb einer Assetklasse und Branche einen hohen Anteil des systematischen Risikofaktors erwartet, hat die Analyse gezeigt, dass der systematische Anteil bei Biogasanlagen sehr gering ist. Dieser liegt im Mittelwert bei 10% und im Maximum nicht über 45% des Gesamtrisikos einer Einzelanlage. Das bedeutet zum einen, dass der Umfang des diversifizierbaren Risikos zwischen 55% und 100% liegt. Zum anderen überwiegt das anlagenspezifische Risiko, was dafürspricht, dass die Leistung der Anlage weniger von externen Faktoren sondern mehr von den handelnden Personen und dem Management der Anlage abhängt. Unter Berücksichtigung der Einschränkung, dass für Biogasanlagen weder ein Marktportfolio noch ein Marktindex existieren und dieser auf Basis der Stichprobendaten entwickelt wurde, kann auch die dritte Teilhypothese nicht abgelehnt werden.

Da alle drei Teile der zweiten Hypothese gültig sind, wird die zweite Hypothese nicht abgelehnt. Sowohl Portfoliooptimierung als auch naive Diversifikation führen zu einer Risikoreduktion. Dabei ist das Marktrisiko der Biogasanlageninvestition sehr gering, so dass ein Großteil des Risikos diversifizierbar ist.

Die Modellparameter Rendite, Risiko und Korrelation lassen sich erklären, wodurch allgemeingültige Handlungsempfehlungen für Investoren abgeleitet werden können.

Ziel der Regressionsanalyse ist es allgemeingültige Handlungsempfehlungen für die Investitionsentscheidung abzuleiten, die eben nicht die Verfügbarkeit von Daten und die mathematische Optimierung voraussetzen, sondern auf den spezifischen Eigenschaften der Biogasanlagen beruhen. Den höchsten Erklärungsgehalt weist die Rendite auf, die durch die Variablen Anlagevermögen (Größe der Anlage) und Eigenkapitalquote beeinflusst wird.

In den Wirtschaftlichkeitsberechnungen und der Beschreibung von Beispielanlagen in der Literatur werden in der Regel größere Anlagen als profitabler dargestellt als kleinere Anlagen. Die Regressionsanalyse hat hingegen gezeigt, dass ein negativer Zusammenhang zwischen Größe und Rendite besteht. Das heißt, kleinere Anlagen sind mit einer höheren Rendite verbunden als größere Anlagen.

Der Erklärungsgehalt der Standardabweichung ist geringer als der der Rendite. Diese wird durch die unabhängigen Variablen Anlagevermögen, Eigenkapitalquote und Alter beeinflusst. Der Erklärungsgehalt des Value at Risk und Conditional Value at Risk ist höher als der von der Standardabweichung, was auf den höheren Erklärungsgehalt der Rendite zurückzuführen ist. Diese fließt in die Berechnung der beiden Risikomaße Value at Risk und Conditional Value

at Risk mit ein. Beide Risikomaße lassen sich zum Teil durch die variablen Eigenkapitalquote und Alter erklären. Da die Parameter Rendite, Standardabweichung, Value at Risk sowie Conditional Value at Risk leichter zu beobachten sind und insbesondere die erwartete Rendite die Investitionsentscheidung beeinflusst, liegt der größere Mehrwert in der Erklärung der Korrelationen.

Der Regressionsanalyse liegt die Annahme zu Grunde, dass Biogasanlagen umso weniger korrelieren, je unterschiedlicher sie in ihren Eigenschaften sind. Im Umkehrschluss wäre für Investoren vorteilhaft in sehr unterschiedliche Biogasanlagen zu investieren, um vom Portfolioeffekt zu profitieren. Obwohl die verwendeten unabhängigen Variablen zur Erklärung der Korrelation hochsignifikant sind, ist der Erklärungsgehalt so gering, dass keine Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können. Die Hypothese, dass sich die Modellparameter erklären lassen und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können, wird abgelehnt. In diesem Zusammenhang soll nochmal erwähnt werden, dass die Datenbasis auf Jahresabschlussdaten beschränkt ist. Würden über die Jahresabschlussdaten hinaus weitere Informationen zu den Eigenschaften der Biogasanlagen zur Verfügung stehen, hätten weitere Variablen berücksichtigt werden können und ggf. der Erklärungsgehalt des Regressionsmodells verbessert werden können. Hier könnten weitere Forschungsvorhaben ansetzen.

Nach den Ausführungen zu den drei Hypothesen, von denen zwei im Rahmen dieser Arbeit nicht abgelehnt werden können, soll nun die übergeordnete Forschungsfrage *„Wie und in welchem Umfang können Investoren durch Anwendung der Portfoliotheorie das Risiko-Rendite-Verhältnis bei Investitionen in Biogasanlagen positiv beeinflussen?“* beantwortet werden. Investoren in Biogasanlagen können sich die Erkenntnisse der Portfoliotheorie zunutze machen, indem sie in mehrere Biogasanlagen investieren und dadurch einen Diversifikationseffekt erzielen. Das Portfolio-Selection-Modell von Markowitz kann in Verbindung mit einer mathematischen Optimierung grundsätzlich genutzt werden, wobei die Einschränkungen eher bei den Rahmenbedingungen zu suchen sind. Wie zu erwarten, ist der Umfang der Risikoreduktion bei optimierten Portfolios größer als bei naiver Diversifikation. Gleichzeitig ist die mathematische Portfoliooptimierung bei Biogasanlagen in der Praxis eher unrealistisch. Dennoch kann auch durch naive Diversifikation eine Risikoreduktion erzielt werden. Bereits ab einer Portfoliogröße von 15 Einzelanlagen wird das unsystematische Risiko fast vollständig eliminiert. Die Analyse hat gezeigt, dass Biogasanlagen entgegen anderer erneuerbarer Energien, wie zum Beispiel Windkraftanlagen, kaum systematischen Risiken ausgesetzt sind.

6 Zusammenfassung

Das Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (EEG) aus dem Jahr 2000 mit seinen Novellierungen in den folgenden Jahren regelt die Anschluss- und Abnahmepflicht von Strom aus erneuerbaren Quellen und garantiert eine feste Einspeisevergütung für 20 Jahre. Dadurch sind Biogasanlagen für institutionelle und private Investoren zu einer attraktiven Anlagemöglichkeit geworden. Trotz der Sicherheit bei der Abnahme- und Preiskomponente durch das EEG sind Investitionen in Biogasanlagen mit Risiken verbunden. In Deutschland gibt es aktuell rund 10.000 Biogasanlagen, wobei auf dem Markt zunehmend Konsolidierungstendenzen zu beobachten sind und es eine Vielzahl von Investoren gibt, die mehr als 10 Biogasanlagen betreiben.

Die auf den Überlegungen von Markowitz basierenden Erkenntnisse der Portfoliotheorie wurden bereits erfolgreich auf Anwendungsgebiete außerhalb der Finanzwirtschaft, wie z.B. erneuerbare Energien übertragen. Die Frage ist, ob sich bei Investitionen in Biogasanlagen ebenfalls ein Portfolioeffekt nachweisen lässt und wie Investoren ganz konkret das Rendite-Risiko-Verhältnis ihrer Portfolios optimieren können. Die Biogasanlage als Sachwertinvestition unterscheidet sich in Ihren Eigenschaften von Wertpapierinvestitionen. In Bezug auf die Anwendbarkeit der Portfoliotheorie stellt allein die Verfügbarkeit historischer Daten als Basis für Ertrags- und Risikoprognosen einen großen Unterschied dar.

Die Parameterschätzung als Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Portfoliotheorie und als Grundlage für weitere Analysen basiert auf historischen Bilanzdaten von 180 Biogas-Gesellschaften, welche auf der Internetseite des Bundesanzeigers erhoben wurden. Für die 180 Biogas-Gesellschaften konnten Erwartungswerte für die Rendite, die Risikomaße Standardabweichung, Value at Risk sowie Conditional Value at Risk und eine Kovarianzmatrix geschätzt werden.

Das Ermitteln der Effizienzkurve und der risikominimalen Portfolios hat gezeigt, dass durch Portfoliooptimierung das Risiko gegenüber dem mittleren Risiko der Einzelanlage um bis zu 95% reduziert werden kann. Die Standardabweichung des Minimumvarianzportfolios liegt bei nur 0,32%, während das durchschnittliche Risiko der Einzelanlage bei 6,59% liegt. Ähnliche Ergebnisse wurden für die alternativen Risikomaße Value at Risk und Conditional Value at Risk erzielt.

Die Quantifizierung des Portfolioeffekts bei der Markowitz-Diversifikation durch mathematische Optimierung setzt Annahmen, wie z.B. die beliebige Teilbarkeit und Handelbarkeit der Einzelanlagen voraus, was bei Investitionen in Biogasanlagen nicht der Realität entspricht. Deshalb wurde in einem zweiten Schritt unter realistischeren Annahmen der Portfolioeffekt bei naiver Diversifikation und der Beitrag der Einzelanlage auf das Portfoliorisiko untersucht. Im

Ergebnis kann auch durch naive Diversifizierung eine Risikoreduktion erreicht werden, wobei diese nicht dem Umfang bei mathematischer Optimierung entspricht. Bei naiver Diversifizierung sinkt das Risiko mit zunehmender Portfoliogröße, wobei ab einer Anzahl von 15-20 Biogasanlagen im Portfolio die Risikoreduktion durch die Investition in eine weitere Anlage sehr gering ist.

Um das Risikoreduktionspotenzial der Einzelanlage zu quantifizieren, wurde das Gesamtrisiko in eine systematische und eine unsystematische Komponente aufgeteilt. Die Ermittlung der Beta-Faktoren setzt die Existenz eines Marktportfolios bzw. eines Marktindex voraus. Da für Biogasanlagen kein Marktindex existiert wurde dieser auf Basis der Stichprobe ermittelt. Die Aufteilung des Gesamtrisikos hat gezeigt, dass der systematische Anteil des Risikos bei Biogasanlagen sehr gering ist und der unsystematische, anlagenspezifische Anteil überwiegt. Ein Großteil des Risikos kann demnach diversifiziert werden. Das ist ein wesentlicher Unterschied zu vielen anderen Assetklassen, wie Aktien oder auch Windparks, die stärker einem systematischen Risiko unterliegen. Außerdem untermauert die Tatsache das Argument, dass der Erfolg von Biogasanlagen sehr stark von den handelnden Personen und dem Anlagenmanagement abhängt.

Da grundsätzlich bei Investitionen in Biogasanlagen ein Portfolioeffekt nachgewiesen werden konnte, gilt für Investoren die Handlungsempfehlung bei der Portfoliozusammensetzung darauf zu achten, dass die Einzelanlagen eine möglichst niedrige Korrelation aufweisen. Da vor allem die Korrelationen von Biogasanlagen schwer zu beobachten ist, dient die Regression dazu Korrelationen auf Basis einfacher zu beobachtender Eigenschaften der Biogasanlagen abzuleiten. Der Erklärungsgehalt des Regressionsmodells für die Korrelationen war so gering, dass keine Handlungsempfehlungen abgeleitet werden konnten. Der Erklärungsgehalt der Parameter Rendite und Risiko ist höher, wobei diese Variablen auch für Investoren leicht zu beobachten sind.

Von den drei aufgestellten Hypothesen konnten jene zur Anwendbarkeit der Portfoliotheorie für Investitionen in Biogasanlagen sowie die zur positiven Wirkung der Portfoliobildung auf das Rendite-Risiko-Verhältnis nicht widerlegt werden. Die dritte Hypothese hinsichtlich der Erklärbarkeit der Modellparameter wurde insbesondere für die Korrelation abgelehnt. Um hinsichtlich der Korrelation Handlungsempfehlungen für Investoren ableiten zu können, besteht weiterer Forschungsbedarf. Auf Basis der verwendeten verfügbaren Daten konnten nur wenige Anlageneigenschaften als unabhängige Variablen im Regressionsmodell getestet werden. Eine umfassendere Datenbasis, zum Beispiel zu den technischen Eigenschaften der Biogasanlagen oder dem Anlagenmanagement, könnten die Schätzgüte des Modells verbessern.

Da bei Investitionen in Biogasanlagen ein erheblicher Diversifikationseffekt erzielt werden kann, sollten Investoren die Erkenntnisse der Portfoliotheorie bei Investitionsentscheidungen berücksichtigen, um ihre Portfolios zu optimieren und das Risiko zu minimieren. Gleichzeitig stellt der dargestellte Portfolioeffekt bei Investitionen in Biogasanlagen einen Erklärungsansatz für das auf dem Markt zu beobachtende Konsolidierungsverhalten dar.

Literaturverzeichnis

- Abdi, H. (2007). The Bonferonni and Šidák Corrections for Multiple Comparisons. In N. Salkind, *Encyclopedia of Measurement and Statistics*. Thousand Oaks: SAGE Publications, Inc.
- Alexander, G. J. (2009). From Markowitz to modern risk management. *The European Journal of Finance*, 15, S. 451-461.
- Böttcher, J. (2012). Projektfinanzierung eines Biogas-Projekts. In J. Böttcher, *Management von Biogas-Projekten*, S. 17-50. Berlin Heidelberg: Springer Gabler.
- Böttcher, J. & Blattner, P. (2013). *Projektfinanzierung: Risikomanagement und Finanzierung*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- BALANCE Erneuerbare Energien GmbH (2023). *BALANCE Erneuerbare Energien GmbH erwirbt zwei neue Biogasanlagen in Sachsen*. Internet: <https://www.balance-vng.de/news/balance-erneuerbare-energien-gmbh-erwirbt-zwei-neue-biogasanlagen-in-sachsen/>, abgerufen am 04.11.2023
- Bamberg, G., Baur, F. & Krapp, M. (2017). *Statistik: Eine Einführung für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler*. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg.
- Barchmann, T., Pohl, M., Denysenko, V., Fischer, E., Hofmann, J., Lenhart, M., Postel, J. & Liebetau, J. (2021). *Biogas-Messprogramm III*. Leipzig: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- Beinhofer, B. (2009). *Zur Anwendung der Portfoliotheorie in der Forstwirtschaft - Finanzielle Optimierungsansätze zur Bewertung von Diversifikationseffekten*. Dissertation an der Technischen Universität München, Fachgebiet Waldinventur und nachhaltige Nutzung.
- Berenz, S., Bochmann, G. & Heißenhuber, A. (2008). Strategien zur Risikominimierung beim Betrieb von Biogasanlagen. In *Risikomanagement in der Landwirtschaft*, S. 185-223. Frankfurt am Main: Edmund Rehwinkel Stiftung.
- Bestmann, U. (2011). *Betriebswirtschaftliche Formelsammlung: Kommentierte Kennzahlen*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2022). *Durchschnittliche EEG-Vergütung für Biomasseanlagen in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2022*. Internet: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173258/umfrage/durchschnittliche-eeg-verguetung-von-biomasseanlagen-seit-2009>, abgerufen am 04.11.2023
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz auf Basis Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) (2022). *Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2022*. Internet: https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Entwicklung/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland.html, abgerufen am 04.11.2023
- Borchert, J. & Schemm, R. (2007). Einsatz der Portfoliotheorie im Asset Allokations-Prozess am Beispiel eines fiktiven Anlageraumes von Windkraftstandorten. *ZfE - Zeitschrift für Energiewirtschaft*, 31, S. 311-322.

- Breuer, W., Gürtler, M. & Schuhmacher, F. (2010). *Portfoliomanagement I: Grundlagen*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- Brockhaus Enzyklopedie online (2023). *Risiko*. Internet: <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/risiko>, abgerufen am 04.11.2023
- Bruns, C. & Meyer-Bullerdiek, F. (2013). *Professionelles Portfoliomanagement: Aufbau, Umsetzung und Erfolgskontrolle strukturierter Anlagestrategien*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.
- Busse von Colbe, W., Laßmann, G. & Witte, F. (2015). *Investitionstheorie und Investitionsrechnung*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Campbell, J., Lettau, M., Malkiel, B. & Xu, Y. (2001). Have Individual Stocks Become More Volatile? An Empirical Exploration of Idiosyncratic Risk. *The Journal of Finance*, 56, S. 1-43.
- Chaves-Schwintek, P. (2013). *The Modern Portfolio Theorie Applied to Windfarm Investments*. Dissertation an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fakultät II Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften.
- Döhler, H., Eckel, H., Fröba, N., Grebe, S., Grube, J., Hartmann, S., Hauptmann, A., Horlacher, D., Horn, C., Hofmann, M., Häußermann, U., Möller, K., Klages, S., Sauer, N., Nakazi, S., Niebaum, A., Paterson, M., Roth, U., Schultheiß, U., Stadelmann, M., Vandr , R., Wirth, B., Witzel, E. & Wulf, S. (2013). *Faustzahlen Biogas*. Darmstadt: Kuratorium f r Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL)
- Döhler, H., Hartmann, S., Keymer, U., Niebaum, A., Paterson, M., Reinhold, G., Stadelmann, M. & Wirth, B. (2016).  konomie. In *Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung*, S. 152-170. G lzwow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- DAH Gruppe (2023). *Biogas - Energie der Zukunft*. Internet: <https://www.dah-gruppe.de/energie/#c117>, abgerufen am 04.11.2023
- Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Trommler, M., Reinholz, T., V ller, K., Beil, M. & Beyrich, W. (2017). Anlagenbestand Biogas und Biomethan - Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland. *DBFZ Report Nr. 30*, Herausgeber: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinn tzige GmbH
- Degenhart, H. & Holstenkamp, L. (2011). *Finanzierungspraxis von Biogasanlagen in der Landwirtschaft: Eine empirische Untersuchung zu Stand und Entwicklungslinien*. Wiesbaden: Gabler.
- Denysenko, V., Fischer, El., Gattermann, H., Jung, U., Postel, J., Reinelt, T., Schattauer, A., Scheibe, S., Scholwin, F., Stinner, W., Weidele, T. & Weiland, P. (2016). Anlagentechnik zur Biogasbereitstellung. *Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung*, S. 21-67. G lzwow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
- Dunlop, J. (2004). Modern Portfolio Theory Meets Wind Farms. *The Journal of Private Equity*, 7, S. 83-95, Herausgeber: Euromoney Institutional Investor PLC
- Eder, B. (2012). *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit, Umwelt*. Staufen bei Freiburg:  kobuch Verlag.

- EnviTec Biogas AG (2023). *Unser Geschäftsbereich Eigenbetrieb: Wie wir unsere eigenen Biogasanlagen betreiben*, Internet: <https://www.envitec-biogas.de/unternehmen/geschaeftsbereiche/unser-eigenbetrieb>, abgerufen am 04.11.2023
- Ernst, D. & Schurer, M. (2015). *Portfolio Management: Theorie und Praxis mit Excel und Matlab*. Konstanz, München: UVK Verlag.
- Evans, J. & Archer, S. (1968). Diversification and the Reduction of Dispersion: An Empirical Analysis. *The Journal of Finance*, 23, S. 761-767.
- EZB (2023). *Key ECB interest rates*. Internet: https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/key_ecb_interest_rates/html/index.de.html, abgerufen am 04.11.2023
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2011). *Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage*, Internet: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/pressegrafiken/schema-einer-landwirtschaftlichen-biogasanlage.html>, abgerufen am 04.11.2023
- Fachverband Biogas e.V. (2023). *Branchenzahlen 2022 und Prognose der Branchenentwicklung 2023*, Internet: [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/23-09-25_Biogas_Branchenzahlen-2022_Prognose-2023.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/23-09-25_Biogas_Branchenzahlen-2022_Prognose-2023.pdf), abgerufen am 04.11.2023
- Falk, M., Hain, J., Marohn, F., Fischer, H. & Michel, R. (2014). *Statistik in Theorie und Praxis: Mit Anwendungen in R*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Fenebris.com. (2023). *Implizite Marktrisikoprämie (IMRP): Deutschland*. Internet: <http://www.marktrisikoprämie.de/de.html>, abgerufen am 04.11.2023
- Fischer, B. (2010). *Performanceanalyse in der Praxis : Performancemaße, Attributionsanalyse, Global Investment Performance Standards*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Fischer, E., Gattermann, H., Grope, J., Scholwin, F., Weidele, T. & Weithäuser, M. (2016). *Gasaufbereitung und Verwertungsmöglichkeiten. Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung*, S. 106-127. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
- Friehe, J., Schattauer, A., & Weiland, P. (2016). *Grundlagen der anaeroben Fermentation. Leitfaden Biogas: Von der Gewinnung zur Nutzung*, S. 11-20. Gülzow: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).
- Friese, T. & Dickhoff, N. (2015). *Grundlagen der Projektfinanzierung*. In C. Herbes & C. Friege, *Handbuch Finanzierung von Erneuerbare-Energien-Projekten*, S. 31-46. München: UVK Verlagsgesellschaft mbH.
- Götte, R. (2012). *Das 1x1 des Portfoliomanagements: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für Anfänger und Fortgeschrittene*. Stuttgart: Ibidem.
- Garz, H., Günther, S. & Moriabadi, C. (2006). *Portfolio-Management: Theorie und Anwendung*. Frankfurt am Main: Frankfurt School Verlag.
- Gleißner, W. (2011). *Grundlagen des Risikomanagements im Unternehmen: Controlling, Unternehmensstrategie und wertorientiertes Management*. München: Vahlen.

- Google Maps (2019). *Reppinichen, Wiesenburg/Mark*, Internet: <https://maps.app.goo.gl/nxgcFZjpbxFkNX3PA>, abgerufen am 12.10.2019
- Google Maps. (2021). *Google My Maps*, Internet: https://www.google.com/maps/d/edit?mid=1P4DO1pJY08QOaam8hkboyeULEwZ86AI_&usp=sharing, abgerufen am 18.10.2021
- Grell, A. & Weckbrodt, O. (2006). *Biogas. Leitfaden für Kreditinstitute*. Wuppertal: Energieagentur NRW.
- Gruber, W. (2011). *Hofbiogasanlagen. Was geht wo?*, Internet: <https://www.landwirtschaftskammer.de/duesse/znr/pdfs/2011/2011-03-24-biogas-06.pdf>, abgerufen am 04.11.2023
- Heesen, B. (2020). *Basiswissen Bilanzanalyse: Schneller Einstieg in Jahresabschluss, Bilanz und GuV*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Herbes, C. & Scholwin, F. (2015). Technisch-kommerzielle Risiken im Betrieb von Biogasanlagen und Anlagen zur Verbrennung fester Biomasse. In C. Herbes & C. Friege, *Handbuch Finanzierung von Erneuerbare-Energie-Projekten*, S. 175-200, Konstanz: UVK Verlagsgesellschaft mbH.
- Higham, N. J. (2002). Computing the Nearest Correlation Matrix - A Problem from Finance. *IMA Journal of numerical Analysis*, 22(3), 329-343.
- Hill, P. J. (2012). *Simulative Risikoanalyse von Biomethanprojekten*. Dissertation an der Universität Kassel, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Betriebswirtschaft.
- Holstenkamp, L. & Degenhart, H. (2013). *Bürgerbeteiligungsmodelle für Erneuerbare Energien: Eine Begriffsbestimmung aus finanzwirtschaftlicher Perspektive*. Arbeitspapierreihe Wirtschaft & Recht Nr. 13 der Professur für Finanzierung und Finanzwirtschaft an der Leuphana Universität Lüneburg.
- Israelsen, C. L. (2005). A refinement to the Sharpe ratio and information ratio. *Journal of Asset Management*, 5(6), S. 423–427.
- James, G., Witten, D., Hastie, T. & Tibshirani, R. (2021). *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. New York: Springer.
- Janssen, S. (2014, 11 7). *Warum Biogasanlagen es schwer haben*, Internet: https://rp-online.de/nrw/staedte/viersen/warum-biogasanlagen-es-schwer-haben_aid-20166151, abgerufen am 04.11.2023
- Jonen, A. (2007). *Semantische Analyse des Risikobegriffs: Strukturierung der betriebswirtschaftlichen Risikodefinitionen und literaturempirische Auswertung*. Beiträge zur Controlling-Forschung, No. 11. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Unternehmensrechnung und Controlling.
- Kangari, R. & Riggs, L. S. (1988). Portfolio management in construction. *Construction Management and Economics*, 6:2, S. 161-169.
- Karpfinger, C. (2017). *Höhere Mathematik in Rezepten: Begriffe, Sätze und zahlreiche Beispiele in kurzen Lerneinheiten*, Berlin: Springer.
- Kleeberg, J. (1993). Risikominimale Strategie am Aktienmarkt. *Die Bank*, Nr.3, S. 160-164.

- Kobzar, O. A. (2006). *Whole-farm risk management in arable farming: portfolio methods for farm-specific business analysis and planning*. Dissertation an der Wageningen Universität .
- Kremers, M. (2002). *Risikoübernahme in Industrieunternehmen: Der Value-at-Risk als Steuerungsgröße für das industrielle Risikomanagement, dargestellt am Beispiel des Investitionsrisikos*. Berlin: Dunker & Humblot.
- Lachnit, L. & Müller, S. (2017). *Bilanzanalyse: Grundlagen - Einzel- und Konzernabschlüsse - HGB- und IFRS-Abschlüsse - Unternehmensbeispiele*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Ledoit, O. & Wolf, M. (2003, Juni). Honey, I Shrank the Sample Covariance Matrix. *UPF Economics and Business Working Paper No. 691*.
- Lemmer, A. & Oechsner, H. (2011). Biogaserzeugung. In F. Graf & S. Bajohr, *Biogas: Erzeugung, Aufbereitung, Einspeisung*. München: Oldenbourg Industrieverlag.
- Möller, A. (2008). *Entwicklung eines Qualitätsstandards für Planung und Betrieb für Biomethananlagen zur Verbesserung der Prozessabläufe, Funktionssicherheit, Effektivität und Wirtschaftlichkeit*. Frankfurt am Main: DLG-Verlag-GmbH.
- Maier, K. M. (2007). *Risikomanagement im Immobilien- und Finanzwesen: Leitfaden für Theorie und Praxis*. Frankfurt: Fritz Knapp Verlag.
- Markowitz, H. (1952). Portfolio Selection. *The Journal of Finance*, Vol. 7, No. 1, S. 77-91.
- Markowitz, H. (2008). *Portfolio Selection: Die Grundlagen der optimalen Portfolio-Auswahl*. München: FinanzBuch Verlag.
- Mondello, E. (2015). *Portfoliomanagement. Theorie und Anwendungsbeispiele*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Neumann, H. (2012). *Ein Drittel der Biogasanlagen im roten Bereich*. Internet: <https://www.topagrar.com/energie/news/ein-drittel-der-biogasanlagen-im-roten-bereich-9480386.html>, abgerufen am 04.11.2023
- Penny, P. E. (1982). Modern Investment Theory and Real Estate Analyses. *The Appraisal Journal*, Vol. 48, Issue 1, S. 79-99.
- Peugh, J. & Enders, C. (2004). Missing Data in Educational Research: A Review of Reporting Practices and Suggestions for Improvement. *Review of Educational Research*, Vol 74, Issue 4, S. 525-556.
- Rauh, S., Berenz, S. & Heißenhuber, A. (2007). *Abschätzung des unternehmerischen Risikos beim Betrieb einer Biogasanlage mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode*. Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V., Vol 43.
- Reise, C. (2012). *Nachhaltige Nutzung von Erneuerbaren Energien - Unternehmerisches Investitionsverhalten und Vertragsgestaltung*. Dissertation an der Georg-Augusts-Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften.
- Riessen, C. (2009). Potenzial von Biogasanlagen zur Risikodiversifikation in Abhängigkeit zum landwirtschaftlichen Portfolio. *Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie*, S. 97-106.

- Riessen, C. (2010). *Modellgestützte Risikoanalyse einer Biogasanlageninvestition als Grundlage einer ganzheitlichen Risikobetrachtung und des strategischen Risikomanagements*. Dissertation an der Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät.
- Romeike, F. (2018). *Risikomanagement*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Ruppert, D. & Matteson, D. S. (2015). *Statistics and Data Analysis for Financial Engineering: with R examples*. New York: Springer Science+Business Media.
- Schaper, C., Beitzen-Heineke, C. & Theuvsen, L. (2008). Finanzierung und Organisation landwirtschaftlicher Biogasanlagen: Eine empirische Untersuchung. *Yearbook of Socioeconomics in Agriculture*, S. 39-74.
- Schierenbeck, H. (2000). *Grundzüge der Betriebswirtschaftslehre*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Schnelle, P. & Rehkugler, H. (2009). Diversifikationseffekte verbriefteter Immobilienprodukte. In H. Rehkugler, *Die Immobilie als Kapitalmarktprodukt*, S. 205-250. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Sitt, A. (2003). *Dynamisches Risiko-Management: Zum unternehmerischen Umgang mit Risiken*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Spandau, P. (2005). *Beim Biogas müssen Sie jetzt schärfer rechnen*. Internet: <https://www.topagrar.com/management-und-politik/aus-dem-heft/beim-biogas-muessen-sie-jetzt-schaerfer-rechnen-9771535.html>, abgerufen am 04.11.2023
- Specht, K. & Gohout, W. (2009). *Grundlagen der Kapitalmarkttheorie und des Portfoliomanagements*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Spremann, K. (2008). *Portfoliomanagement*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Staehele, H. (2004). *Das Minimum-Varianz-Portfolio und seine Bedeutung für die Anlagepraxis. Munich Business School Finance Research Series, Band 3*.
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2023). *Bruttostromerzeugung in Deutschland*. Internet: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/Tabellen/bruttostromerzeugung.html>, abgerufen am 04.11.2023
- Statman, M. (1987). How Many Stocks Make a Diversified Portfolio. *The Journal of Finance and Quantitative Analysis*, 22(03), S. 353-363.
- Statman, M. (2004). The Diversification Puzzle. *Financial Analysts Journal*, Vol. 16, No. 4. S. 44-53.
- Stute, A. (2015). *Biogasanlagen im Handels- und Steuerrecht: Rechtsformen - Finanzierung - Bilanzierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Tytco, D. (2003). Grundlagen der Projektfinanzierung. In K. Backhaus & H. Werthschulte, *Projektfinanzierung: Wirtschaftliche und rechtliche Aspekte einer Finanzierungsmethode für Großprojekte*. Stuttgart: Schäffer-Pöschel.
- Vanini, U. (2012). *Risikomanagement: Grundlagen - Instrumente - Unternehmenspraxis*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

- Wöhe, G. & Döring, U. (2020). *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München: Vahlen.
- Wagner, R., Bayer, K., Gehwolf, E. & Göschl, G. (2011). *Finanzierung von landwirtschaftlichen Biogasanlagen – eine Hilfestellung*. Freising: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen e.V.
- Wiese, A., Hermann, M., Bühler, J., Spahic, E. & Küppers, S. (2008). Risikoanalyse von erneuerbaren Energieportfolios. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 6/08, S. 62-66.
- Wolf, K. & Runzheimer, B. (2003). *Risikomanagement und KonTraG: Konzeption und Implementierung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Wolke, T. (2015). *Risikomanagement*. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg.

Anhang (CD-ROM/USB-Stick)

Anhang 1: Bilanzdaten

Anhang 2: Tabelle 20 / 22 / 24 / 26

Anhang 3: Tabelle 28

Anhang 4: Tabelle 30

Anhang 5: Tabelle 33

Anhang 6: Tabelle 35

Anhang 7: Tabelle 38

Anhang 8: Tabelle 41

Anhang 9: Korrelationen zu den Tabellen 50 / 53 / 56 / 59