

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>11</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>15</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>17</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>19</b>
<b>2 Versuchsaufbau und Pflanzenmaterial</b>	<b>27</b>
2.1 Die Mikrokosmos-Systeme . . . . .	27
2.1.1 Aufbau der Mikrokosmos-Systeme . . . . .	28
2.1.2 Expositionskammern der Mikrokosmos-Systeme . . . . .	28
2.1.3 Mikroklima in den Expositionskammern . . . . .	28
2.1.4 CO <sub>2</sub> -Konzentration in den Expositionskammern . . . . .	31
2.1.5 Boden . . . . .	32
2.2 Pflanzenmaterial . . . . .	32
2.2.1 Die juvenilen <i>Quercus robur</i> -Bestände . . . . .	32
2.2.2 Der adulte Bestand im Grunewald . . . . .	32
<b>3 Gaswechsel auf Blattebene</b>	<b>35</b>
3.1 Einleitung . . . . .	35
3.1.1 Photosynthese . . . . .	36
3.1.2 Stomatäre Leitfähigkeit . . . . .	39
3.2 Material und Methode . . . . .	40
3.2.1 Aufbau des Gaswechselmesssystems (CMS-400) . . . . .	40
3.2.2 Durchführung der Gaswechselmessungen . . . . .	42
3.2.2.1 $A_n/c_i$ -Kurven . . . . .	43
3.2.2.2 $A_n/PPFD$ -Kurven . . . . .	44
3.2.2.3 Temperaturabhängigkeit der Nettophotosynthese . . . . .	44
3.2.2.4 Stomatäre Leitfähigkeit . . . . .	44
3.2.2.5 Temperaturabhängigkeit der Blattatmung . . . . .	44
3.2.2.6 Stammatmung . . . . .	45
3.2.3 Berechnung des Gaswechsels . . . . .	45
3.2.3.1 CO <sub>2</sub> - und H <sub>2</sub> O-Differenzwerte . . . . .	45
3.2.3.2 Molare Flussrate . . . . .	47

3.2.3.3	Photosyntheserate	47
3.2.3.4	Transpirationsrate	48
3.2.3.5	Stomatäre Leitfähigkeit	49
3.2.3.6	Interzellulare CO <sub>2</sub> -Konzentration	50
3.2.3.7	Sättigungsdampfdruck und Wasserdampfdruckdefizit	50
3.2.3.8	Relative Luftfeuchtigkeit und Taupunkttemperatur	51
3.2.4	Das Gaswechselmodell	51
3.2.4.1	Photosynthese	51
3.2.4.2	Temperaturabhängigkeit der Photosynthese	53
3.2.4.3	Stomatäre Leitfähigkeit	54
3.2.4.4	Temperaturabhängigkeit der Blattatmung	55
3.2.5	Statistische Auswertung	55
3.2.5.1	$A_n/c_i$ -Kurven	55
3.2.5.2	$A_n/PPFD$ -Kurven	57
3.2.5.3	Temperaturabhängigkeit	57
3.2.5.4	Stomatäre Leitfähigkeit	58
3.2.5.5	Test-Verfahren	59
3.2.6	Blattanalysen	59
3.2.6.1	Bestimmung der Blattfläche	59
3.2.6.2	Bestimmung des LMA	60
3.2.6.3	Bestimmung der C- und N- Konzentration	60
3.3	Ergebnisse	60
3.3.1	Nettophotosynthese	60
3.3.1.1	CO <sub>2</sub> -Abhängigkeit der Nettophotosynthese	61
3.3.1.2	$A_n/c_i$ -Kurven	63
3.3.1.3	Strahlungsabhängigkeit der Nettophotosynthese	69
3.3.1.4	$A_n/PPFD$ -Kurven	73
3.3.1.5	Temperaturabhängigkeit der Nettophotosynthese	76
3.3.1.6	Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseparameter	78
3.3.1.7	Stickstoffabhängigkeit der Photosyntheseparameter	81
3.3.1.8	Stickstoffabhängigkeit der Elektronennutzungseffizienz	87
3.3.2	Stomatäre Leitfähigkeit	87
3.3.2.1	CO <sub>2</sub> -Abhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit	88
3.3.2.2	Strahlungsabhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit	91
3.3.2.3	Stickstoffabhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit	94
3.3.2.4	Das Jarvis-Modell	95
3.3.2.5	Das Ball-Berry-Modell	102
3.3.2.6	Stickstoffabhängigkeit der Ball-Berry-Parameter	104
3.3.3	Atmung	105
3.3.3.1	Blattatmung im Dunkeln	105
3.3.3.2	Blattatmung bei Licht	105
3.3.3.3	Stammatmung	107
3.3.4	Zeitliche Veränderungen der Gaswechselparameter	108
3.4	Diskussion	111
3.4.1	Die Methode der Analyse von $A_n/c_i$ -Kurven	111
3.4.2	Akklimatisation der Nettophotosynthese	112
3.4.3	Lichtabhängigkeit der Nettophotosynthese	116
3.4.4	Temperaturabhängigkeit der Nettophotosynthese	118

3.4.5	Stickstoffabhängigkeit der Nettophotosynthese . . . . .	120
3.4.6	Stomatäre Leitfähigkeit . . . . .	122
<b>4</b>	<b>Wachstum und Bestandesstruktur</b>	<b>127</b>
4.1	Einleitung . . . . .	127
4.2	Material und Methoden . . . . .	129
4.2.1	Bestandesstruktur der juvenilen Eichenbestände . . . . .	129
4.2.1.1	Ernte der Biomasse . . . . .	129
4.2.1.2	Wachstumsparameter . . . . .	131
4.2.1.3	Blattflächenindex . . . . .	131
4.2.1.4	Blattachsenwinkel . . . . .	132
4.2.2	Strahlungsprofile . . . . .	132
4.3	Ergebnisse . . . . .	132
4.3.1	Wachstum der juvenilen Eichenbestände . . . . .	132
4.3.2	Biomassenzunahme . . . . .	136
4.3.3	Bestandesstruktur . . . . .	138
4.3.3.1	Vertikale Blattflächenverteilung . . . . .	138
4.3.3.2	Vertikale Kronenraumprofile des LMA . . . . .	141
4.3.3.3	Vertikale Kronenraumprofile des Blattstickstoffs . . . . .	143
4.3.3.4	Strahlungsprofile . . . . .	144
4.3.3.5	Abhängigkeit der Strahlung vom kumulativen <i>LAI</i> . . . . .	145
4.3.3.6	Abhängigkeit des <i>LMA</i> von der Strahlung . . . . .	146
4.3.3.7	Abhängigkeit des Blattstickstoffgehalts von der Strahlung . . . . .	148
4.3.3.8	Blattstickstoff und <i>LMA</i> . . . . .	148
4.3.3.9	Vertikale Kronenraumprofile der Photosyntheseparameter . . . . .	150
4.4	Diskussion . . . . .	152
4.4.1	Wachstum . . . . .	152
4.4.2	Bestandesstruktur . . . . .	154
<b>5</b>	<b>Bestandesgaswechsel und Modellierung</b>	<b>159</b>
5.1	Einleitung . . . . .	159
5.2	Methode . . . . .	161
5.2.1	CO <sub>2</sub> -Gaswechsel der Modellökosysteme . . . . .	161
5.2.2	Wasserhaushalt der Modellökosysteme . . . . .	162
5.2.3	Bestandesmodell FORSTFLUX . . . . .	164
5.3	Ergebnisse . . . . .	167
5.3.1	CO <sub>2</sub> -Gaswechsel . . . . .	167
5.3.2	Evapotranspiration der Modellökosysteme . . . . .	175
5.3.3	Modellierung des Bestandesgaswechsels . . . . .	181
5.3.3.1	Modellierter CO <sub>2</sub> -Gaswechsel . . . . .	182
5.3.3.2	Modellierte Evapotranspiration . . . . .	188
5.3.3.3	Vergleich der verschiedenen Modelle der Blattleitfähigkeit . . . . .	192
5.3.3.4	Einfluss der Bestandesstruktur auf den Bestandesgaswechsel . . . . .	194
5.3.3.5	Simulationsläufe unter veränderten Klimabedingungen . . . . .	197
5.4	Diskussion . . . . .	202
5.4.1	Gemessener Bestandesgaswechsel . . . . .	202
5.4.2	Modellierung des Bestandesgaswechsels . . . . .	204
5.4.3	Auswirkung veränderter Bestandesstruktur . . . . .	205

## **INHALTSVERZEICHNIS**

---

5.4.4	Temperatureffekte auf den Bestandesgaswechsel	206
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>209</b>
<b>7</b>	<b>Summary</b>	<b>213</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>217</b>
<b>A</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>241</b>
<b>B</b>	<b>Modellparameter und Modellergebnisse</b>	<b>245</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Mikrokosmos-Systeme mit juvenilen <i>Quercus robur</i> -Beständen . . . . .	29
2.2	Mikroklima in den Expositionskammern im Juli 1997 . . . . .	30
2.3	Bodenwassergehalt im Juli und August 1997 . . . . .	31
2.4	Juvenile <i>Quercus robur</i> -Bestände im ersten Versuchsjahr . . . . .	33
3.1	Blockschaltbild zur Funktionsweise des Gaswechselmesssystems CMS-400 . . . . .	41
3.2	Gaswechselmessung im adulten Bestand . . . . .	42
3.3	Abweichungen der Leermessung vom Nullpunkt . . . . .	46
3.4	Kalibriergerade der Gasmischsanlage . . . . .	47
3.5	$A_n/c_i$ -Kurve mit den beiden Teilfunktionen der Nettophotosynthese . . . . .	64
3.6	$A_n/c_i$ -Kurven gemessen in 1996, 1997 und 1998 . . . . .	65
3.7	Gegenüberstellung der Photosyntheseparameter $V_{cmax}$ und $J_{max}$ . . . . .	67
3.8	$V_{cmax}$ und $J_{max}$ bei unterschiedlichen kinetischen Eigenschaften der RuBisCO . . . . .	68
3.9	$A_n/PPFD$ -Kurve ausgewertet nach Smith und Farquhar . . . . .	69
3.10	$CO_2$ -Abhängigkeit des Lichtkompensationspunktes und der Quantenausbeute . . . . .	70
3.11	$A_n/PPFD$ -Kurven bei verschiedenen $CO_2$ -Konzentrationen . . . . .	72
3.12	$A_n/PPFD$ -Kurven gemessen in 1997 und 1998 . . . . .	74
3.13	$J_{max}$ aus den beiden Lichtmodellen vs. $J_{max}$ aus den $A_n/c_i$ -Kurven. . . . .	75
3.14	Temperaturabhängigkeit von $A_n$ . . . . .	77
3.15	Verschiebung des Temperaturoptimums der Nettophotosynthese . . . . .	78
3.16	Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseparameter . . . . .	81
3.17	Abhängigkeit der Photosyntheseparameter vom Blattstickstoffgehalt . . . . .	82
3.18	Abhängigkeit der Photosyntheseparameter von der Blattstickstoffkonzentration .	83
3.19	Abhängigkeit der Photosyntheseparameter vom <i>LMA</i> . . . . .	86
3.20	Stickstoffabhängigkeit der Elektronennutzungseffizienz . . . . .	87
3.21	$CO_2$ -Abhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit . . . . .	89
3.22	Strahlungsabhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit . . . . .	92
3.23	Strahlungsabhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit bei verschiedenen $g_s$ . . . . .	93
3.24	Stickstoffabhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit bei verschiedenen $g_s$ . . . . .	94
3.25	Jarvis-Modell im Bestand juv350: $g_s$ vs. <i>PPFD</i> und $c_a$ . . . . .	96
3.26	Jarvis-Modell im Bestand juv350: $g_s$ vs. $c_a$ und $N_a$ . . . . .	97
3.27	Jarvis-Modell im Bestand juv350: $g_s$ vs. $N_a$ und <i>PPFD</i> . . . . .	98
3.28	Jarvis-Modell im Bestand juv700: $g_s$ vs. <i>PPFD</i> und $c_a$ . . . . .	99
3.29	Jarvis-Modell im Bestand juv700: $g_s$ vs. $c_a$ und $N_a$ . . . . .	100
3.30	Jarvis-Modell im Bestand juv700: $g_s$ vs. $N_a$ und <i>PPFD</i> . . . . .	101
3.32	Abhängigkeit der Steigung des Ball-Berry-Modells von $A_n$ . . . . .	102
3.31	Abhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit vom Ball-Berry-Koeffizienten . . . . .	103
3.33	Stickstoffabhängigkeit der Steigung des Ball-Berry-Modells . . . . .	105

3.34 Temperaturabhängigkeit der Blattatmung . . . . .	106
3.35 Abhängigkeit der Blattatmung vom Blattstickstoffgehalt und vom <i>LMA</i> . . . . .	106
3.36 Stammatmung in Abhängigkeit vom basalen Stammdurchmesser . . . . .	107
3.37 Zeitliche Veränderung von $V_{cmaz}$ , $J_{max}$ , $N_a$ , <i>LMA</i> und $g_1$ . . . . .	109
3.38 Prozentuale Veränderungen von $N_a$ , $V_{cmaz}$ , $J_{max}$ , $R_i$ , <i>LMA</i> und $g_1$ . . . . .	110
4.1 Zunahme des basalen Stammdurchmessers der einzelnen Eichensämlinge . . . . .	133
4.2 Zunahme der Stammhöhe der einzelnen Eichensämlinge . . . . .	134
4.3 Wachstum von <i>Quercus robur</i> in den Beständen juv350 und juv700 . . . . .	135
4.4 Vertikale Blattflächenverteilung . . . . .	139
4.5 Vertikale Kronenraumprofile des <i>LAI</i> . . . . .	139
4.6 Vertikale Kronenraumprofile des <i>LMA</i> . . . . .	142
4.7 Abhängigkeit des <i>LMA</i> vom kumulativen Blattflächenindex . . . . .	142
4.8 Vertikale Kronenraumprofile von $N_a$ und $N_m$ . . . . .	143
4.9 Blattstickstoffgehalt in Abhängigkeit des kumulativen Blattflächenindex . . . . .	144
4.10 Vertikale Kronenraumprofile der Strahlung . . . . .	145
4.11 Strahlung in Abhängigkeit des kumulativen Blattflächenindex . . . . .	146
4.12 Strahlungsbabhängigkeit des <i>LMA</i> . . . . .	147
4.13 Strahlungsbabhängigkeit des Blattstickstoffgehalts . . . . .	147
4.14 Blattstickstoffgehalt in Beziehung zum <i>LMA</i> . . . . .	149
4.15 Vertikale Kronenraumprofile von $V_{cmaz}$ - und $J_{max}$ . . . . .	151
4.16 Strahlungsbabhängigkeit von $V_{cmaz}$ - und $J_{max}$ . . . . .	151
5.1 Kalibrierung des Kippwaagensystems zur Bestimmung der Kondensatmengen . . . . .	164
5.2 Übersichtsdiagramm des Bestandesmodells FORSTFLUX . . . . .	166
5.3 Tagesgänge des CO <sub>2</sub> -Gaswechsels . . . . .	169
5.4 Jahresverlauf des CO <sub>2</sub> -Gaswechsels . . . . .	170
5.5 Licht- und Temperaturabhängigkeit des CO <sub>2</sub> -Gaswechsels . . . . .	173
5.6 Temperaturabhängigkeit des maximalen <i>NEF</i> und des Lichtkompensationspkt. . . . .	174
5.7 Tagesgänge der Evapotranspiration der juvenilen Eichenbestände . . . . .	176
5.8 Jahresverlauf der Evapotranspiration . . . . .	177
5.9 Licht- und Temperaturabhängigkeit der Evapotranspiration . . . . .	180
5.10 Wassernutzungseffizienz der juvenilen Eichenbestände . . . . .	181
5.11 Tagesgänge des gemessenen und modellierten CO <sub>2</sub> -Gaswechsels im Juli 1997 . . . . .	183
5.12 Vergleich des gemessenen und modellierten CO <sub>2</sub> -Gaswechsels im Juli 1997 . . . . .	183
5.13 Jahresverlauf des gemessenen und modellierten CO <sub>2</sub> -Gaswechsels . . . . .	185
5.14 Vergleich des gemessenen und modellierten CO <sub>2</sub> -Gaswechsels in 1997 und 1998 . . . . .	186
5.15 Jahresverlauf der modellierten Bestandesnettophotosynthese und -respiration . . . . .	187
5.16 Tagesgänge der gemessenen und modellierten Evapotranspiration im Juli 1997 . . . . .	189
5.17 Vergleich der gemessenen und modellierten Evapotranspiration im Juli 1997 . . . . .	189
5.18 Jahresverlauf der gemessenen und modellierten Evapotranspiration . . . . .	190
5.19 Vergleich der gemessenen und modellierten Evapotranspiration in 1997 und 1998 . . . . .	191
5.20 Jahresverlauf des CO <sub>2</sub> -Gaswechsels bei verschiedenen Temperaturstufen . . . . .	199
5.21 Jahresverlauf der Bestandesphotosynthese und -respiration bei erhöhter Temp. . . . .	200
5.22 Jahresverlauf der Evapotranspiration bei verschiedenen Temperaturstufen . . . . .	201

# Tabellenverzeichnis

3.1	Aufstellung und Zeitrahmen der durchgeföhrten Gaswechselmessungen	43
3.2	Kinetische Eigenschaften der RuBisCO	56
3.3	Nettophotosyntheseraten und der $\text{CO}_2$ -bedingte Anstieg $dA_{n700:350}$	62
3.4	Differenzen der Nettophotosyntheseraten $A_{n350}$ und $A_{n700}$	62
3.5	Die physiologischen Parameter der Photosynthese: $V_{cmax}$ , $J_{max}$ und $R_i$	66
3.6	Differenzen der Parameter $V_{cmax}$ und $J_{max}$	66
3.7	Statistische Analyse der $V_{cmax}/J_{max}$ Beziehungen	68
3.8	Lichtkompensationspunkte und Quantenausbeute	71
3.9	Parameter der Lichtabhängigkeit der Photosynthese	75
3.10	Parameter der Temperaturabhängigkeit von $V_{cmax}$	79
3.11	Parameter der Temperaturabhängigkeit von $J_{max}$	80
3.12	Regressionsergebnisse der $N_a$ -Abhängigkeiten von $V_{cmax}$ und $J_{max}$	84
3.13	Statistische Analyse der $N_a$ -Abhängigkeiten von $V_{cmax}$ und $J_{max}$	85
3.14	Blattstickstoff bezogen auf Blattmasse und Blattfläche	85
3.15	Stomatäre Leitfähigkeit bei 350 und 700 $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{CO}_2$	90
3.16	Die prozentualen Unterschiede der stomatären Leitfähigkeit	90
3.17	Interzellulare $\text{CO}_2$ -Konzentrationen bei 350 und 700 $\mu\text{mol mol}^{-1}$	91
3.18	Regressionsergebnisse des Jarvis-Modells	102
3.19	Parameter des Ball-Berry Modells und der nach Leuning modifizierten Version	104
3.20	Stammatmungsraten bezogen auf die Trockenmasse	108
4.1	Aufstellung und Zeitrahmen der durchgeföhrten Messungen an den Beständen	130
4.2	Biomassenakkumulation der Pflanzenorgane	137
4.3	Biomassezunahme (gesamt) der beiden juvenilen Bestände	137
4.4	Blattstickstoffgehalt, $LMA$ und Blattflächenindex in den Kronenschichten	140
4.5	Regressionsergebnisse der $N_a/LMA$ -Beziehung	149
4.6	Statistische Analyse der $N_a/LMA$ -Beziehungen	150
5.1	Monats- und Jahressummen des $\text{CO}_2$ -Gaswechsel	168
5.2	Vergleich der gemessenen und der aus dem $NEF$ berechneten Biomassezunahme	172
5.3	Monats- und Jahressummen des Evapotranspiration	178
5.4	Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Modellen der Blattleitfähigkeit	193
5.5	Auswirkungen der Bestandesstruktur auf den Bestandesgaswechsel	195
5.6	Bestandesgaswechsel bei unterschiedlichen Temperaturstufen	198
A.1	Abkürzungsverzeichnis	241
B.1	Modellparameter der Bestände juv350 und juv700	245

## TABELLENVERZEICHNIS

---

B.3 Regressionsergebnisse des $NEF_{mod}/NEF_{mes}$ -Vergleichs . . . . .	249
B.5 Regressionsergebnisse des $ET_{mod}/ET_{mes}$ -Vergleichs . . . . .	251