

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Abschlusses
Bachelor of Sciences in Environmental Engineering

Substitution von Kohle durch Energiepflanzen im Unterglasgartenbau

Hochschule: HAW-Hamburg

Fakultät: Life Sciences

Straße: Lohbrügger Kirchstrasse 65

vorgelegt von: Dirk Maximilian Ullrich

Betreuer: Prof. Dr. Jörg Andreaä
Dipl.- Ing. Fritz Sollmann

7. Juni 2013

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelor–Thesis selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z.B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den 7. Juni 2013

DIRK MAXIMILIAN ULLRICH

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei Herrn Jörg Andreä für seine Betreuung und intensive Unterstützung bedanken. Herrn Fritz Sollmann gebührt ebenfalls ein herzlicher Dank. Seine Geduld und die langen Gespräche waren überaus hilfreich. Außerdem danke ich dem Betriebsinhaber für die Besichtigung des Betriebes und der Bereitstellung der Daten.

Ein besonderer Dank richtet sich an Isabella Nördemann und Silvia Brückner, die trotz aller „Strapazen“ immer bereit waren die Arbeit auf Fehler und Einheitlichkeit zu überprüfen. Sie haben mir viele wichtige Tipps und Anregungen gegeben. Auch bei der Organisation und zeitlichen Einteilung haben sie mir sehr geholfen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abbildungsverzeichnis | VI |
| Tabellenverzeichnis | VII |
| Zusammenfassung | 1 |
| Vorwort | 2 |
| 1 Gründe für den Wechsel des Primärenergieträgers | 3 |
| 1.1 Entwicklung des Energiebedarfs | 3 |
| 1.2 Umweltauswirkungen | 5 |
| 1.2.1 Natürlicher Treibhauseffekt | 6 |
| 1.2.2 Anthropogener Treibhauseffekt | 7 |
| 2 Nachhaltigkeit als Rahmenbedingung | 9 |
| 2.1 Nachhaltige Entwicklung | 9 |
| 2.2 Starke und schwache Nachhaltigkeit | 10 |
| 2.3 Nachhaltigkeit bei Anbau und Verwertung von Energiepflanzen | 12 |
| 3 Biomasse | 13 |
| 3.1 Vierlande | 13 |
| 3.2 Energiepflanzen | 15 |
| 3.2.1 Lignocellulosepflanzen | 16 |
| 3.2.2 Ölpflanzen | 21 |
| 3.2.3 Zucker- und Stärkepflanzen | 24 |
| 3.2.4 Geeignete Energiepflanzen | 27 |
| 3.3 Umwandlungs- und Veredelungsprozesse in Bezug auf Energiepflanzen | 28 |
| 3.4 Verbrennung | 29 |
| 3.4.1 Aufheizung, Trocknung | 30 |
| 3.4.2 Pyrolytische Zersetzung | 30 |
| 3.4.3 Vergasung | 31 |
| 3.4.4 Oxidation | 31 |
| 4 Betriebsbeschreibung | 33 |
| 4.1 IST-Zustand | 33 |
| 4.2 Energiebedarf | 34 |
| 4.3 Anthrazitkohlebedarf | 35 |
| 4.4 Leistung der Feuerung | 36 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.5 | Daten zur Energieträgerumstellung | 37 |
| 5 | Energieträgerumstellung | 39 |
| 5.1 | Wärmebereitstellung | 39 |
| 5.1.1 | Unterschubfeuerung | 43 |
| 5.1.2 | Rostfeuerungen | 44 |
| 5.1.3 | Schubbodenfeuerung | 46 |
| 5.2 | Feuerungsanlagen für den Betrieb | 47 |
| 5.2.1 | Grundlast Feuerungsanlage | 47 |
| 5.2.2 | Spitzenlast Feuerungsanlage | 49 |
| 5.2.3 | Kombination der Feuerungsanlagen | 51 |
| 5.3 | Aufbereitung und Lagerung | 54 |
| 5.3.1 | Hackgut Bereitstellung | 55 |
| 5.3.2 | Holzpellets Bereitstellung | 57 |
| 5.3.3 | Strohpellets Bereitstellung | 58 |
| 5.3.4 | Lagerkapazitäten der gewählten Energiepflanzen | 60 |
| 5.4 | Anbau und Ernte | 60 |
| 5.5 | Kosten für den Ankauf von Hackgut und Pellets | 62 |
| | Literaturverzeichnis | 63 |
| | Anhang | 67 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Weltweite Entwicklung der Erdölförderung | 4 |
| 1.2 | Ursachen für den anthropogenen Treibhauseffekt | 7 |
| 1.3 | Entwicklung der Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre der letzten 10.000 Jahre | 8 |
| 2.1 | Nachhaltigkeitsdreieck | 10 |
| 3.1 | Die Vier- und Marschlande | 14 |
| 3.2 | Mittlere Tagesmittellufttemperatur und Niederschlagsmenge in Hamburg von 1961 bis 1990 | 15 |
| 3.3 | Zeitraum einer möglichen Vegetationsperiode der Sonnenblume über Lufttemperatur und Niederschlag | 24 |
| 3.4 | Schematischer Aufbau der unterschiedlichen Veredelungsmöglichkeiten von Biomasse zur Bereitstellung verschiedenförmiger Brennstoff | 28 |
| 3.5 | Phasen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe | 29 |
| 4.1 | Einfluss der solaren Strahlung auf den Wärmebedarf | 34 |
| 4.2 | Jährlicher Leistungsverlauf des benötigten Heizkessels | 37 |
| 5.1 | Bereitstellungskette von Anbau bis Nutzung von Energiepflanzen | 39 |
| 5.2 | Feuerungsprinzipien für feste Biomasse | 40 |
| 5.3 | Schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung | 43 |
| 5.4 | Schematische Darstellung einer Vorschubrostfeuerung | 45 |
| 5.5 | Schematische Darstellung einer Schubbodenfeuerung | 46 |
| 5.6 | Leistungsbereich der Grundlast-Feuerung | 48 |
| 5.7 | Leistungsbereich der Spitzenlast-Feuerung | 50 |
| 5.8 | Leistungsbereich der Feuerungsanlagen | 52 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Weltweite sicher verfügbare Ressourcen fossiler Energieträger im Jahr 2010 | 4 |
| 3.1 | Energieträgerrelevante Eigenschaften von Weiden und Pappeln | 16 |
| 3.2 | Durchschnittlicher jährlicher Trockenmasse-Zuwachs von Pappeln und Weiden | 17 |
| 3.3 | Energieträgerrelevante Eigenschaften von Futtergräsern | 18 |
| 3.4 | Energieträgerrelevante Eigenschaften von Weizen, Roggen und Triticale . . . | 20 |
| 3.5 | Durchschnittlicher Trockenmasse-Zuwachs von Weizen, Roggen und Triticale | 20 |
| 3.6 | Energieträgerrelevante Eigenschaften von Rapsöl | 22 |
| 3.7 | Energieträgerrelevante Eigenschaften von Sonnenblumenöl | 23 |
| 3.8 | Energieträgerrelevante Eigenschaften von Ethanol aus Zuckerrüben | 25 |
| 3.9 | Energieträgerrelevante Eigenschaften von Ethanol aus Kartoffeln | 26 |
| 3.10 | Energieträgerrelevante Daten von Pappeln, Weiden und Futtergräsern | 27 |
| 4.1 | IST-Zustand | 33 |
| 4.2 | Technische Daten des Betriebes | 38 |
| 5.1 | Eigenschaften der Festbett-, Wirbelschicht- und Staubfeuerung | 41 |
| 5.2 | Eigenschaften der unterschiedlichen Festbettfeuerungen | 42 |
| 5.3 | Feuerungsanlagen zur Grundlast-Abdeckung | 48 |
| 5.4 | Feuerungsanlagen zur Spitzenlast-Abdeckung | 50 |
| 5.5 | Feuerungsanlagen zur Spitzenlast-Abdeckung | 53 |
| 5.6 | Kosten und Flächenbeanspruchung der Feuerungsanlagen | 54 |
| 5.7 | Brennstoffeigenschaften für die BIOMAT FBS 100 und die BIOMAT FBS 800 | 55 |
| 5.8 | Lagerkapazitäten der Brennstoffe | 60 |
| 5.9 | Flächenbedarf für den Anbau der Energiepflanzen | 61 |
| 5.10 | Preise für Hackschnitzel, Holzpellets und Kohle | 62 |

Zusammenfassung

Die Bachelorarbeit „Substitution von Kohle durch Energiepflanzen“ behandelt einen beispielhaften Gartenbaubetrieb aus den Vier- und Marschlanden in Hamburg, der Gerberapflanzen im Unterglasgartenbau produziert und als Schnittblumen verkauft. Hierfür werden die Gewächshäuser zur Zeit über eine Feuerung, die als Brennstoff Anthrazitkohle nutzt, beheizt. Aufgrund steigender Energiekosten sollen in Zukunft Energiepflanzen statt Kohle als Brennstoff dienen.

Die Energiepflanzen, die unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit, in der Region angebaut werden können, sind Pappeln, Weiden und Futtergräser. Pappeln und Weiden zeichnen sich, im Vergleich zu Futtergräsern, durch einen höheren Heizwert von $5,14 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}_{\text{Tm}}}$ aus, können aber nur alle drei bis zehn Jahre geerntet werden. Der Heizwert von Futtergräsern liegt bei $4,47 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}_{\text{Tm}}}$. Dafür können sie zwei bis drei mal im Jahr geerntet werden.

Der Gartenbaubetrieb hat eine Gewächshausfläche von 7.000 m^2 die im Jahresdurchschnitt auf $14 \text{ }^\circ\text{C}$ beheizt wird. Hierfür werden jährlich 350 t Kohle mit einem Heizwert von $9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ verbrannt. Das entspricht einem jährlichen Energiebedarf von 3.150 MWh zu Kosten von 73.500 € .

Um den Leistungsbereich von 30 bis 820 kW gewährleisten zu können, werden zwei Feuerungen eingesetzt (BIOMAT FBS 800 und BIOMAT FBS 100 der Firma FERRO Wärmetechnik GmbH). Beides sind Festbettfeuerungen und verbrennen Hackgut, Holz- und Strohpellets. Wird Hackgut verbrannt, beläuft sich die Lagerkapazität auf 2.802 bis $3.155 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$ an Holzhackschnitzeln oder 2.296 bis $2.585 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$ geschichtetem Holz. Werden Holzpellets verbrannt müssen jährlich noch 811 bis 913 m^3 Pellets oder 1.561 bis 1.758 m^3 vorgehalten werden. Bei der Verarbeitung von Futtergräsern beläuft sich die jährliche Lagerkapazität auf 911 bis 1.026 m^3 Strohpellets. Dies entspricht einer Lagerkapazität von 1.593 bis $1.794 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$ Stroh.

Weiterhin beansprucht der Anbau von Pappeln, Weiden oder Futtergräsern zur Deckung des gesamten Wärmebedarfs eine Fläche von min. $46,8 \text{ ha}$ für Pellets aus Pappeln und max. $110,7 \text{ ha}$ für Hackgut aus Weiden. Für Futtergräser muss eine Anbaufläche von $53,1$ bis $59,8 \text{ ha}$ vorgehalten werden.

Wird der Brennstoff, in Form von Hackgut, zugekauft ergeben sich jährliche Kosten von 65.416 bis 73.653 € . Soll mit Holzpellets geheizt werden, ergeben sich Kosten von 109.026 bis $122.756 \frac{\text{€}}{\text{a}}$. Im Vergleich zu den Kosten für die Kohle, ist Hackgut demnach günstiger und Holzpellets sind teurer. Desweiteren ist mit Preissteigerungen von Kohle zu rechnen, da ab dem Jahr 2014 sämtliche Fördermittel der Bundesregierung für die Kohleförderung entfallen.

Vorwort

Die folgende Bachelorarbeit „Substitution von Kohle durch Energiepflanzen im Unterglasgartenbau“ stellt exemplarisch die Umstellung des Brennstoffes von Kohle zu verschiedenen Energiepflanzen in einem beispielhaften Gartenbaubetrieb dar. Hierbei werden verschiedene Brennstoffe, die aus Energiepflanzen gewonnen und in der näheren Umgebung der Vier- und Marschlande (Hamburg) angebaut oder bezogen werden können, berücksichtigt. Des Weiteren wird anhand des Jahreswärmebedarfverlaufs die Feuerung ausgelegt und konkrete Feuerungsanlagen vorgestellt.

Um die Hintergründe der Abschlussarbeit besser verstehen zu können, werden zunächst ökologische, soziale und ökonomische Gründe für eine Primärenergieumstellung aufgezeigt. Anschließend wird auf die Rahmenbedingung „Nachhaltige Entwicklung“ eingegangen. Es wird verständlich gemacht, dass Pflanzen als ressourcenschonende Energieträger nur sinnvoll genutzt werden können, wenn diese auch nachhaltig produziert werden.

Das darauf folgende Kapitel behandelt unterschiedliche Energiepflanzen, die zur Bereitstellung der Gewächshausbeheizung in den Vier- und Marschlanden genutzt werden können und die in den weiteren Kapiteln für ebendiese Zwecke betrachtet werden. Außerdem werden die Umwandlungs- und Veredelungsprozesse vorgestellt, über die der Brennstoff hergestellt wird.

Anschließend wird der beispielhafte Gartenbaubetrieb über den Wärmebedarf der Gewächshäuser beschrieben, indem zunächst der IST-Zustand, der jährliche Energiebedarf sowie der daraus resultierende Kohlebedarf ermittelt wird. Weiterhin wird anhand dieser Daten die benötigte Leistung der Feuerung dargestellt.

Darauf folgend werden mögliche Umstellungen zu den verschiedenen Pflanzen als Energieträger betrachtet. Hierbei wird auf die Flächenbeanspruchung für den Anbau dieser Pflanzen ebenso wie auf den Flächenverbrauch für Lagerung, Trocknung, Zerkleinerung und schließlich Verbrennung eingegangen. Die Feuerungsanlage wird für die Grundlast- und Spitzenlastbereitstellung ausgelegt. Des Weiteren werden die Kosten verglichen, die für die Bereitstellung der verschiedenen Brennstoffe anfallen.

1 Gründe für den Wechsel des Primärenergieträgers

Die Verknappung fossiler Energieträger, die wachsende Energienachfrage sowie die Beschränkung der Energiereserven auf wenige Regionen der Welt sind u.a. Gründe für ständige Energiepreissteigerungen. Hinzu kommt der anthropogen verursachte Klimawandel infolge steigender Umweltbelastungen. Diese Aspekte machen deutlich, dass ein politisches und ökonomisches Umdenken im Bereich des Energieeinsatzes erforderlich ist. Der folgende Abschnitt 1.1 beschreibt die drastische Zunahme des Energiebedarfes und soll damit verdeutlichen, wie wichtig ein Umstieg von fossilen zu nachhaltigen Energieträgern, auch aus der wirtschaftlichen Perspektive, ist. Der darauf folgende Abschnitt 1.2 legt die ökologischen und sozialen Hintergründe, die ein Umdenken in der Energiebereitstellung unumgänglich machen, dar.

1.1 Entwicklung des Energiebedarfs

Früher wurde der Heizenergiebedarf überwiegend durch das Verbrennen von Holz gedeckt. Ebenso waren Wind- und Wasserkraft durch die landwirtschaftliche Beanspruchung des Bodens bekannt. Diese Kräfte wurden durch Mühlen, beispielsweise zur Entwässerung, und zum Korn mahlen genutzt. Mit Beginn der Industrialisierung wurden die Mühlen vermehrt durch Dampfmaschinen ersetzt. Die Folge war ein rapider Anstieg des Primärenergieverbrauches, der am Beispiel der Welt-Erdölförderung des letzten Jahrhunderts in der Abbildung 1.1 dargestellt ist.

1.1 Entwicklung des Energiebedarfs

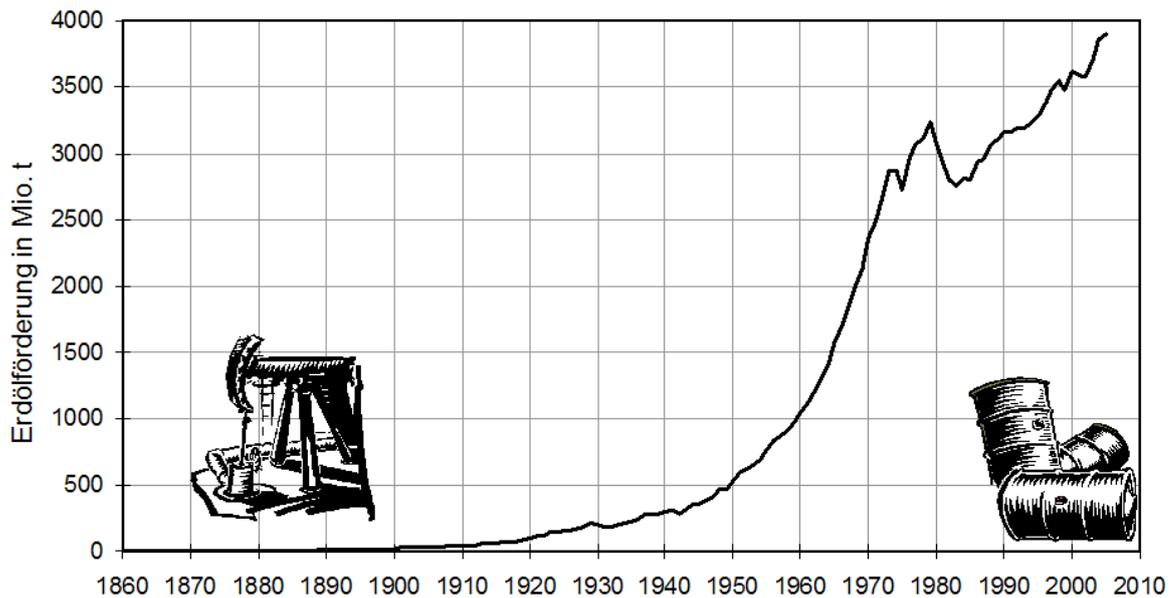


Abb. 1.1: Weltweite Entwicklung der Erdölförderung

Quelle: (Quaschnig 2007)

Ab dieser Zeit (um 1890) wurde anstelle von Holz vermehrt Kohle verbrannt, wodurch die Energie, aufgrund der höheren Energiedichte, immer und überall bereitgestellt werden konnte. Durch die zunehmende Automatisierung gewann auch das Erdöl immer mehr an Bedeutung. Heute spielt das Erdgas eine wichtige Rolle beim Abfangen von Spitzenlasten. Jedoch gewann es erst nach dem zweiten Weltkrieg und die umstrittene Atomenergie erst in den 1960er-Jahren an Bedeutung und konnten Kohle und Erdöl nie ablösen. (Quaschnig 2007)

Spätestens seit der Zeit der Ölkrisen in den 1970er-Jahren wächst das Bewusstsein darüber, dass das Erdölvorkommen, aber auch alle anderen fossilen Energieträger nicht endlos zur Verfügung stehen. Die folgende Tabelle 1.1 zeigt, welche Mengen an endlichen fossilen Energieträgern weltweit noch zur Verfügung stehen und wie lange diese voraussichtlich noch gefördert werden können.

Tab. 1.1: Weltweite sicher verfügbare Ressourcen fossiler Energieträger im Jahr 2010

| Energieträger | Menge [Mio.t] | Jahresverbrauch [$\frac{\text{Mio.t}}{\text{a}}$] | stat. Reichweite [a] |
|---------------|---------------|---|----------------------|
| Erdöl | 234.300 | 4.059,6 | 58 |
| Erdgas | 160.468 | 2.481,6 | 65 |
| Kohle | 860.938 | 5.320,4 | 162 |

Quelle: eigene Darstellung (nach BP 2012)

Die statistische Reichweite in Tabelle 1.1 gibt an, wie lange ein Energieträger bei konstantem Jahresverbrauch noch zur Verfügung steht. Zu den sicher verfügbaren Mengen fossiler Energieträger summieren sich Ressourcen deren Förderung und Aufbereitung eine negative Energiebilanz oder einen Kostenmehraufwand zur Folge hätten.

Durch die steigende Nachfrage und dem sinkenden Angebot werden fossile Energieträger immer teurer, so dass aus wirtschaftlichen und sozialen Gründen ein Umstieg auf nachhaltige Energiesysteme unumgänglich wird.

1.2 Umweltauswirkungen

Ein weiterer Grund von fossilen Energieträgern zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu wechseln sind die Umweltauswirkungen, die durch die Verbrennung entstehen. Hierbei wird immer wieder vom Klimawandel gesprochen. Diese Veränderung des Klimas lässt sich vereinfacht anhand eines Energieerhaltungssatzes erklären:

$$I_s = I_e - I_{refl}$$

I_s : ankommende Strahlungsleistung [$\frac{W}{m^2}$]

I_e : einfallende Strahlungsleistung [$\frac{W}{m^2}$]

I_{refl} : reflektierte Strahlungsleistung [$\frac{W}{m^2}$]

Verändert sich also die auf der Erde ankommende Sonnenstrahlung, oder der Anteil der Sonnenstrahlung der reflektiert wird, verändert sich auch die von der Erde abgestrahlte Wärmestrahlung, was sich auf unser Klima auswirkt. Dies kann aus den folgenden drei Gründen geschehen:

1. Die Umlaufbahn der Erde um die Sonne ändert sich. Dies würde direkten Einfluss auf die ankommende Sonnenstrahlung nehmen.
2. Die Albedo der Erdoberfläche ändert sich infolge einer Änderung der Bewölkung, der Eisbedeckung, der Landnutzung oder der Verteilung der Kontinente.
3. Die Konzentration der Treibhausgase und Aerosole verändert sich. Eine Erhöhung führt zu einer Verstärkung des Treibhauseffektes.

Durch die Verbrennung fossiler Energieträger werden die Treibhausgase vermehrt in der Atmosphäre freigesetzt. Daher soll in den nächsten Abschnitten genauer auf den Treibhauseffekt eingegangen werden. (Rahmstorf & Schellnhuber 2007)

1.2.1 Natürlicher Treibhauseffekt

Der natürliche Treibhauseffekt wird durch die atmosphärische Treibhausgaskonzentration natürlichen Ursprungs verursacht. Die Gase, die den größten Anteil am Treibhauseffekt haben sind:

- Wasserdampf H_2O ,
- Kohlenstoff CO_2 ,
- Methan CH_4 und
- Distickstoffoxid N_2O .

Treibhausgase haben kaum Auswirkungen auf die kurzwellige Einstrahlung der Sonne, absorbieren aber einen Teil der langwelligen Rückstrahlung der Erde, die dann als atmosphärische Gegenstrahlung wieder an die Erde zurück gegeben wird. Nach dem Energieerhaltungssatz erhöht sich demnach, die auf die Erde eintreffende und somit auch abgestrahlte Wärmestrahlung. Dieser Effekt, ohne den das Leben, wie es auf der Erde ist nicht möglich wäre, wird „Treibhauseffekt“ genannt. Das der Treibhauseffekt so wichtig für unser Klima ist, soll das folgende Rechenbeispiel verdeutlichen:

$$\text{Gegeben: } I_e = 342 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}; I_{refl} = 30 \%; \sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$I_s = I_e \cdot (1 - I_{refl}) = 342 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot (1 - 30 \%) \approx 240 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Stefan-Boltzmannsches Strahlungsgesetz:

$$I_s = \sigma \cdot T^4 \Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{I_s}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{240 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5,670 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}}} \approx 255 \text{ K} \Rightarrow -18 \text{ }^\circ\text{C}$$

I_s : ankommende Strahlungsleistung [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]

I_e : einfallende Strahlungsleistung [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]

I_{refl} : reflektierte Strahlungsleistung [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$]

σ : Proportionalitätsfaktor [$\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$]

T : absolute Temperatur [K]

Nach dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz stellt sich demnach eine Temperatur von $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ auf der Erde ein, wenn der Treibhauseffekt nicht zugegen ist. Somit wäre ein Leben, auf diesem Planeten, wie wir es kennen nicht möglich und die Erdoberfläche bestünde vollständig aus Eis. Die tatsächliche Durchschnittstemperatur der Erde beträgt allerdings $15 \text{ }^\circ\text{C}$, was eine Temperaturdifferenz von $33 \text{ }^\circ\text{C}$ ausmacht. Wird weiterhin betrachtet, dass

sich die Änderung der absoluten Temperatur in der vierten Potenz auswirkt, verdeutlicht wie verheerend ein Temperaturanstieg auf der Erde um nur wenige Grad Celsius ist. (Rahmstorf & Schellnhuber 2007; Quaschnig 2007; Paus 2002)

1.2.2 Anthropogener Treibhauseffekt

Anders als der lebensnotwendige natürliche Treibhauseffekt bewirkt der anthropogene Treibhauseffekt eine Temperaturerhöhung über die 15 °C hinaus. Er verstärkt somit den natürlichen Treibhauseffekt. Übertragen auf die Energiebilanz bedeutet dies, dass die Strahlung der Treibhausgase die Auswirkung der solaren Einstrahlung verstärkt. Um ein energetisches Gleichgewicht herzustellen muss sich folglich die Wärmestrahlung der Erde um eben diesen Anteil erhöhen. Die Ursachen für den anthropogenen Treibhauseffekt sind in Abbildung 1.2 dargestellt.

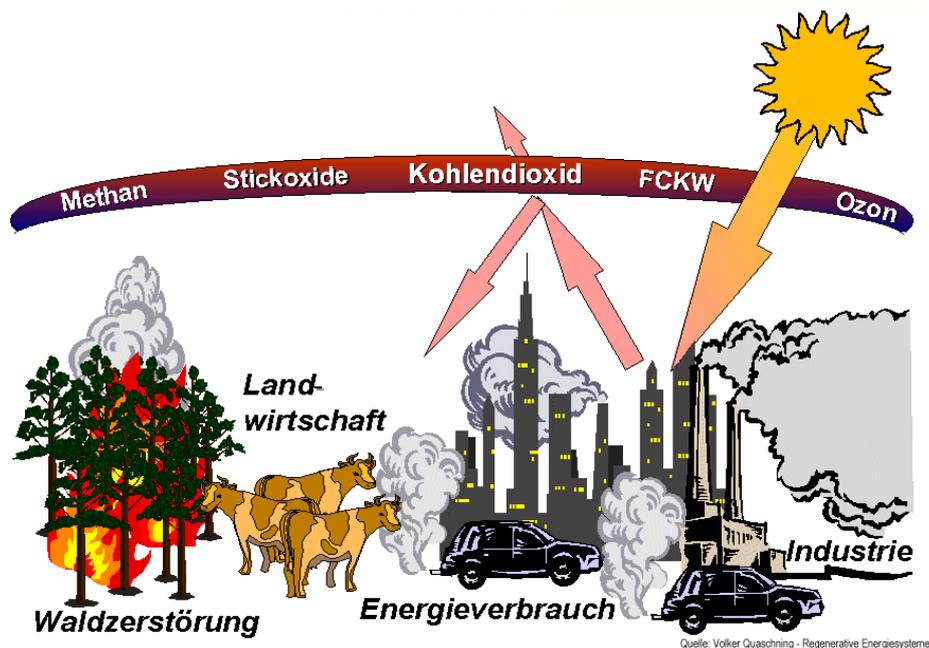


Abb. 1.2: Ursachen für den anthropogenen Treibhauseffekt

Quelle: (Quaschnig 2007)

Die Freisetzung der Treibhausgase kann, wie aus Abbildung 1.2 ersichtlich, in verschiedene „Verursacher“-Bereiche eingeteilt werden. Hierbei ist anzumerken, dass die verschiedenen Bereiche untereinander verschmelzen. Beispielsweise benötigt die Industrie Energie, oder die Landwirtschaft Flächen, die z.B. durch Brandrodungen gewonnen werden. Eine andere ebenfalls ersichtliche Unterteilung ist die der verschiedenen Treibhausgase. Abbildung 1.3 zeigt die Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen in den letzten 10.000 Jah-

1.2 Umweltauswirkungen

ren.

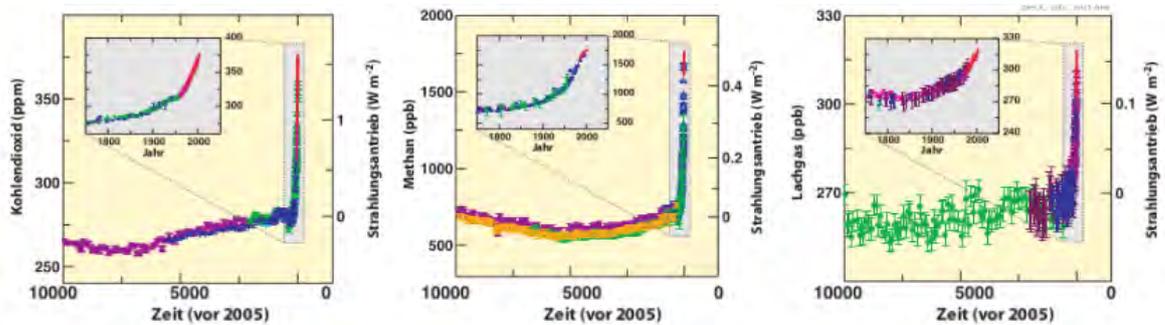


Abb. 1.3: Entwicklung der Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre der letzten 10.000 Jahre

Quelle: (Arblaster et al. 2007)

Erkennbar ist, dass die Konzentrationen erst ab ca. 1900 stark zunehmen. Während die Konzentrationserhöhung von Methan und Lachgas der Landwirtschaft zuzuschreiben sind, sind Landnutzungsänderungen und die Verbrennung fossiler Energieträger Ursache der drastisch gestiegenen Kohlendioxidkonzentration. Damit die Verbrennung von Energiepflanzen keine negativen Auswirkungen auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration hat, müssen diese nachhaltig produziert werden. Die Bedeutung der Nachhaltigkeit wird in Kapitel 2 erklärt.

2 Nachhaltigkeit als Rahmenbedingung

Ein Aspekt, der berücksichtigt werden muss, gerade wenn Pflanzen zur Energiebereitstellung angebaut werden, ist deren nachhaltige Produktion. Die folgenden Abschnitte 2.1 und 2.2 sollen den Begriff der „nachhaltigen Entwicklung“ näher erläutern.

2.1 Nachhaltige Entwicklung

Zunächst werden einige wesentliche Aspekte und Grundzüge der Nachhaltigkeitsidee aufgezeigt. Ursprünglich kommt der Begriff „Nachhaltigkeit“ aus der Forstwirtschaft. Bis in das 19. Jahrhundert lässt sich die Nachhaltigkeit in diesem Lebensbereich zurückverfolgen. Schon damals war der Wald so zu bewirtschaften, dass dieser auch in Zukunft noch eine ertragreiche Holzwirtschaft ermöglicht (Wilbers 2006).

Im Jahr 1987 beschrieb die „Brundtland-Kommission“ den Begriff der nachhaltigen Entwicklung als eine Entwicklung die nur dauerhaft ist, wenn die Bedürfnisse der Gegenwart sowie die der zukünftigen Generationen ohne Risiken befriedigt werden kann. Grundlage ist ein Weltbild, dass die Bedürfnisse und das Wesen des Menschen in den Mittelpunkt stellt (anthropozentrisches Weltbild). Als weiteres Element ist der ethische Aspekt anzusehen, welcher die generationenübergreifende ebenso wie die globale Gerechtigkeit zum Ziel hat (World Commission on Environment and Development 1987).

Aus der Vielzahl wichtiger Vorhaben mit Bedeutung für die Nachhaltige Entwicklung soll hier Folgendes kurz angesprochen werden:

In Rio de Janeiro wurde 1992 von 178 Mitgliedstaaten auf der United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), im Rahmen des Weltgipfels der United Nations Organization (UNO), die Agenda 21 beschlossen und verabschiedet. Die Unterzeichnerstaaten erklären sich in ihr bereit, gemeinsam einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung zu leisten. Parallel dazu wurde auf einer Konferenz die Convention on Biological Diversity (CBD) ebenso wie die Waldgrundsatzerklärung beschlossen. Hieraus gingen unter anderem Definitionen und wichtige Handlungsansätze für die zukünftigen und gegenwärtigen Anforderungen des komplexen Waldsystems mit seinen Schutz-, Nutz- und Erholungsfunktionen hervor.

Eine der Grundlagen der Agenda 21 ist die Einsicht der Notwendigkeit einer Vernetzung von Ökologie, Gesellschaft und Ökonomie. Diese Vernetzung wird durch das, in der Abbildung 2.1 dargestellte, sogenannte magische Nachhaltigkeitsdreieck verdeutlicht.

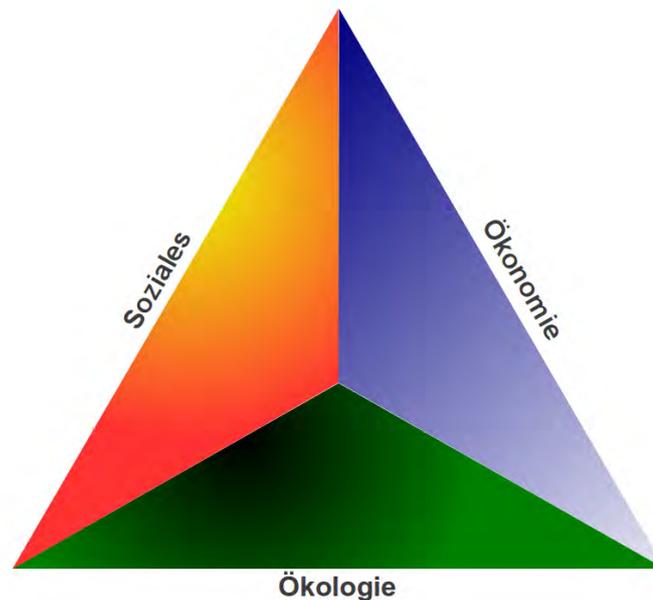


Abb. 2.1: Nachhaltigkeitsdreieck

Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 2.1 soll eine ganzheitliche Betrachtung der wirtschaftlichen Entwicklung (ökonomische Sicherheit), der Lösung von Umweltproblemen (ökologisches Gleichgewicht) und des Umgangs mit sozialen Konfliktpotenzialen (soziale Gerechtigkeit) ausdrücken, welches die angestrebten Ziele der Agenda 21 sind. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 1992)

Mit Blick darauf hat sich die Bezeichnung als sog. drei Rio-Säulen, nämlich Ökonomie, Ökologie und Soziales, herausgebildet. In der Folgezeit hat es insoweit zunehmend kritische Einschätzungen zu diesem Modellansatz gegeben, unter anderem auch deswegen, weil zentrale Schlüsselbereiche wie Bildung und Kultur hierbei unzureichend, oftmals nur mittelbar angesprochen werden.

Zwei Jahre hat es seinerzeit gedauert bis die Dokumente des Rio-Erdgipfels (z.B. die Agenda 21) in deutscher Sprache verfügbar waren. Ab diesem Zeitpunkt begann die Diskussion über die Umsetzbarkeit.

2.2 Starke und schwache Nachhaltigkeit

Umstritten ist die Gewichtung der einzelnen Zielsetzungen. Oftmals wird von einer gleichberechtigten Umsetzung von umweltbezogenen, sozialen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeitszielen ausgegangen. Eine undifferenzierte, unausgeglichene Gleichrangigkeit der ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeitsziele stößt auf Ablehnung. Ein Grund, der dafür spricht, die ökologische Nachhaltigkeit in den Mittelpunkt zu stellen, ist der Schutz

der natürlichen Lebensgrundlagen, die Grundvoraussetzung für ökonomische und soziale Stabilität sind.

In der Wissenschaft wird dazu eine Diskussion unter den Leitbegriffen „schwache“ und „starke“ Nachhaltigkeit geführt. Dazu ist anzumerken, dass es sich bei der „schwachen“ Nachhaltigkeit um ein Aufwiegen der ökologischen, ökonomischen und sozialen Ressourcen gegen- und untereinander handelt. Kritisch zu bewerten ist hierbei, dass eine Akzeptanz der Erschöpfung von natürlichen Ressourcen (Naturkapital) für angemessene Mengen an Human- oder Sachkapital hingenommen wird. Ökonomie und Ökologie können hier gegebenenfalls auf einer gleichrangigen Ebene angesiedelt werden. Bei der „starken“ Nachhaltigkeit wird davon ausgegangen, dass Naturkapital nur sehr beschränkt bzw. gar nicht durch Human- oder Sachkapital ersetzbar ist. (Döring 2004) An diesen Meinungsstreit knüpfen z.B. das „Umweltraum-Konzept“, der „Ökologische Fußabdruck“ als Modellansatz oder das „Leitplankenmodell“ an, die im Folgenden erläutert werden:

Das Umweltraum-Konzept bildet eine Basis für zahlreiche Nachhaltigkeitsstudien, es baut auf einem globalen Gleichheitsprinzip auf, das heißt jeder Mensch hat das gleiche Recht auf die Inanspruchnahme der natürlichen Ressourcen. Die wichtigsten Kategorien, um den Umweltverbrauch zu messen sind Energie, Material und Flächenbeanspruchung. Für diese werden maximale Belastungsgrenzen definiert (Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. & Bischöfliches Hilfswerk MISEREOR e.V 1996).

Der Ökologische Fußabdruck zeigt auf, wie viel Fläche auf der Erde notwendig ist, um den Lebensstil / Standard eines Menschen dauerhaft zu ermöglichen. Ein Mensch beansprucht bei gegenwärtigem Verbrauch derzeit 2,7 Hektar, wobei der gerechte ökologische Fußabdruck bei 1,8 Hektar liegt. Dies überschreitet die vorhandenen Ressourcen um ca. 50 % (WWF International et al. 2012).

Das Leitplankenmodell, welches vom Wissenschaftlichem Beirat für globale Umweltveränderungen (WBGU) entwickelt und vom Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) ausgearbeitet worden ist, bestreitet die Gleichrangigkeit der drei sogenannten Rio-Säulen. Die ökologischen Parameter, die langfristig stabile Lebensbedingungen auf der Welt sichern, bilden einen Entwicklungskorridor, der unbedingt zu beachten ist. Nur innerhalb dieses Korridors ist Spielraum zur Umsetzung von wirtschaftlichen und sozialen Zielen. (Wehrspaun et al. 2005)

Im April 2001, also neun Jahre nach der sogenannten Rio-Konferenz, wurde der Rat für Nachhaltigkeit berufen, der die Bundesregierung in Bereichen der Nachhaltigkeitspolitik berät. Er soll zudem für eine Integration der Nachhaltigkeit in andere Politikbereiche sorgen (Rat für NACHHALTIGE Entwicklung 2012).

2.3 Nachhaltigkeit bei Anbau und Verwertung von Energiepflanzen

Wird die Produktion von Pflanzen, die ausschließlich zur energetischen Zwecken genutzt werden, unter den Aspekten der Nachhaltigkeit betrachtet, so muss das Produkt Energiepflanze zum einen CO₂-neutral produziert und verwertet werden. Es muss also mindestens soviel neu angebaut werden wie für die energetische Bereitstellung und Nutzung zuvor benötigt wurde. Zum anderen dürfen Energiepflanzen nur in dem Maße angebaut werden, indem sie die Produktion von sozial und ökologisch hochwertigeren Endprodukten nicht im negativen Sinne beeinträchtigen. Die Produktion von Pflanzen als Nahrungsmittel hat demnach Vorrang vor der Produktion von Pflanzen als Energieträger. Eine ausschlaggebende und auch für die Zukunft prognostizierbare Größe stellt hierbei der Flächenbedarf dar. Um Energiepflanzen nachhaltig zu produzieren, dürfen keine Flächen beansprucht werden, die für den Anbau von Pflanzen als Nahrungsmittel benötigt werden. (Kaltschmitt 2009)

Hierbei ist jedoch anzumerken, dass sich die Flächeninanspruchnahme durch den Anbau von Nahrungsmitteln stetig ändert. So wird beispielsweise die flächenspezifische Nahrungsmittel- und Pflanzenproduktion durch Züchtungen stetig erhöht. Zusätzlich sorgen verbesserte Produktionstechniken bzw. die Angleichung der Produktionstechniken an den Stand der Technik ebenfalls für eine Erhöhung der flächenspezifischen Pflanzenproduktion. So fällt z.B. der durchschnittliche flächenspezifische Weizenertrag in Rumänien um 70 % geringer aus als der in Deutschland. Hinzu kommt der weltweite Pro-Kopf-Verbrauch an Nahrungsmitteln, der sich einem Grenzwert annähert. Lediglich der vermehrte Konsum tierischer Produkte wirkt sich negativ auf die Flächeninanspruchnahme der Nahrungsmittelindustrie aus, da diese Produkte mindestens um den Faktor sechs flächenintensiver zu produzieren sind als die gleiche Energiemenge aus pflanzlichen Produkten. (Kaltschmitt 2009)

Im Ergebnis bleibt fest zu halten, dass die Nahrungsmittelproduktion bis Mitte des 21-sten Jahrhunderts um 15 bis 30 % geringer ausfällt als zur Zeit. Darüber hinaus ergeben sich für den nachhaltigen Energiepflanzenanbau insofern positive Rückkopplungseffekte, als dass die Bevölkerungszahl in Europa und insbesondere in Deutschland nur geringzunimmt bzw. sogar leicht abnehmen wird. Aus diesen Entwicklungen, verbunden mit Ertragssteigerungen ergeben sich deutliche Zunahmen der Flächenpotenziale zugunsten des Energiepflanzenanbaus. (Kaltschmitt 2009)

3 Biomasse

Sämtliche Stoffe organischer Herkunft zählen zur Biomasse. Dies beinhaltet lebende und bereits abgestorbene, jedoch noch nicht fossile Phyto- und Zoomasse sowie die daraus resultierenden Rückstände. Die Abgrenzung zu den fossilen Energieträgern ist fließend. Torf wird in Deutschland den fossilen Energieträgern zugeordnet. Des Weiteren werden sämtliche organische Stoffe zur Biomasse gezählt, die durch technische Umwandlung oder stoffliche Nutzung entstehen bzw. anfallen. (Kaltschmitt 2009)

Biomasse ist ein Energieträger, da Pflanzen, aus denen sie besteht, durch den Prozess der Photosynthese solare Strahlungsenergie in chemisch gebundene Energie umwandeln und speichern. Vor diesem Hintergrund wird Biomasse in Primär- und Sekundärprodukte unterteilt:

Primärprodukte sind die gesamte Phytomasse, da diese durch die direkte photosynthetische Ausnutzung der solaren Strahlungsenergie entsteht.

Sekundärprodukte bilden sich aus dem Ab- und Umbau der Primärprodukte in höheren Organismen. Hierzu zählt folglich die gesamte Zoomasse und deren Exkrememente.

Die in den Produkten gespeicherte Energie kann durch unterschiedliche Prozesse in technisch nutzbare Energieformen umgewandelt werden. (Kaltschmitt 2009)

Da der hier als Beispiel für die Substitution von Kohle durch Energiepflanzen dienende Betrieb in den Vierlanden angesiedelt ist, werden zunächst die Klimabedingungen dieser Region angesprochen. Anschließend wird auf unterschiedliche Pflanzen und deren energetischen Nutzen eingegangen. Es wird beschrieben, welche dieser Pflanzen zur Heizenergiebereitstellung unter den Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit in der Region angebaut werden können. Des Weiteren wird auf die technischen Umwandlungs- und Veredelungsprozesse eingegangen, mit welchen diese Pflanzen energetisch aufbereitet werden.

3.1 Vierlande

Die Vierlande sind ein Teilgebiet der Vier- und Marschlande, die zum Bezirk Bergedorf der Freien und Hansestadt Hamburg gehören. Abbildung 3.1 zeigt das Gebiet der Vier- und Marschlande und dessen räumliche Umgebung.

3.1 Vierlande

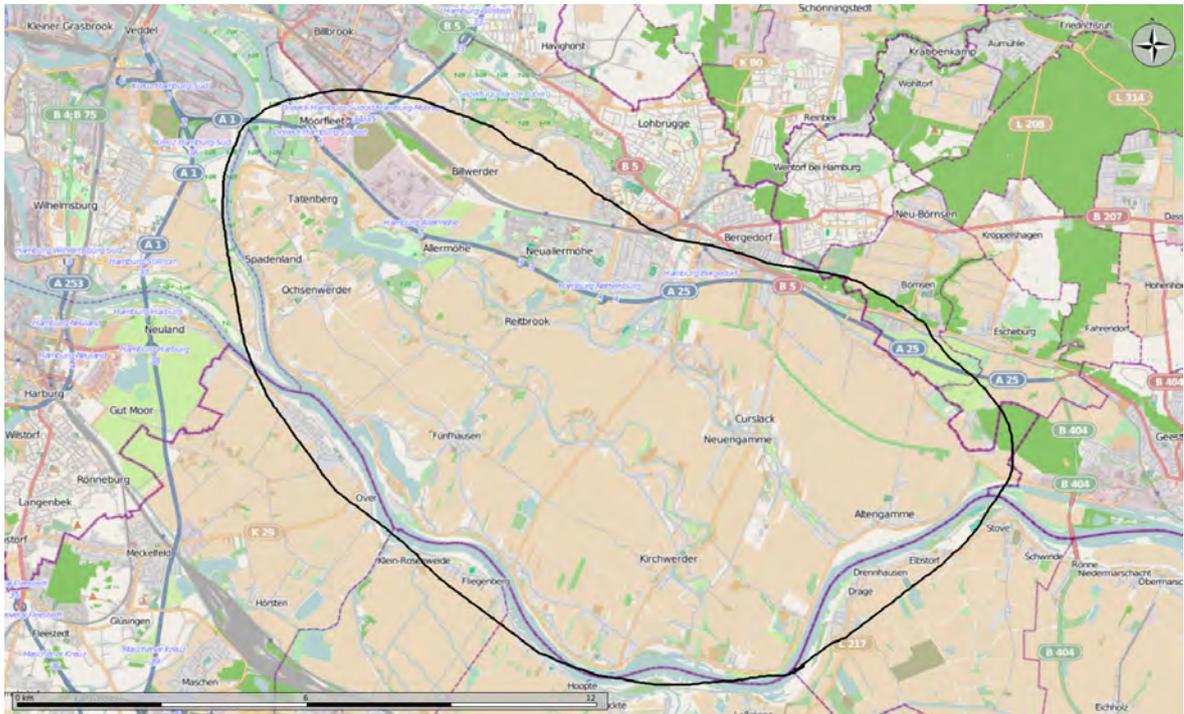


Abb. 3.1: Die Vier- und Marschlande
Quelle: <http://openstreetmap.de/karte.html>

Die Vier- und Marschlande erstrecken sich über 130 km² im Osten von Hamburg und sind das größte zusammenhängende Blumen- und Gemüseanbaugelände in Deutschland. Die in Abbildung 3.1 zu erkennenden Orte im östlichen Teil – Curslack, Neuengamme, Altengamme und Kirchwerder – bilden das Teilgebiet der Vierlande. Es entstand, ebenso wie die Marschlande, aus Sedimentablagerungen, die sich durch den Tiedenhuf der Elbe dort abgelagert haben. Später wurde die Elbe in diesem Gebiet eingedeicht und die beiden Elbarme Dove- und Goseelbe mit Schleusen versehen. Hierdurch war das Land nicht mehr den Gezeiten ausgesetzt. Es wurde bewohnbar und landwirtschaftlich genutzt. (Vollstädt 2011)

Seit der Erschließung des Gebietes ist es nicht nur durch die Nähe zu Hamburg und den nährstoffreichen Boden eine landwirtschaftlich geprägte Region. Das warmgemäßigte Klima, welches in Abbildung 3.2 dargestellt wird, spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. (Vollstädt 2011)

3.2 Energiepflanzen

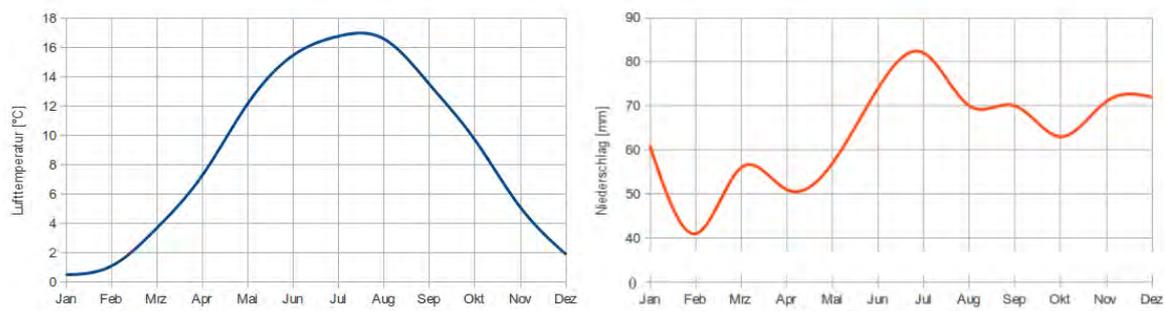


Abb. 3.2: Mittlere Tagesmittellufttemperatur und Niederschlagsmenge in Hamburg von 1961 bis 1990

Quelle: (Deutscher Wetterdienst 2007)

Abbildung 3.2 zeigt, dass die Tagesmittellufttemperatur im Winter stets über 0 °C liegt und in den Sommermonaten keine 18 °C erreicht. Der kälteste Monat ist der Januar mit 0,5 °C und der Wärmste der Juli mit 16,8 °C. Diese milden Temperaturen lassen sich durch den maritimen Einfluss erklären, der in Hamburg durch vorherrschende Westwinde entsteht. Auch die Niederschlagsmengen unterliegen keinen großen Schwankungen. Sie liegen zwischen 41 mm im Februar und 82 mm im Juli, wobei die meisten Niederschläge in der zweiten Jahreshälfte zu verzeichnen sind. (Deutscher Wetterdienst 2007)

Anhand dieser Daten wird, nach der effektiven Klimaklassifikation von Wladimir Köppen, das Klima in Hamburg als warmgemäßigte Klimazone mit feuchttemperiertem Klima und warmem Sommer eingeteilt (Forkel 2008).

3.2 Energiepflanzen

Unter dem Begriff Energiepflanze wird das Primärprodukt der Biomasse verstanden, welches ausschließlich zur energetischen Weiterverarbeitung gezüchtet und angebaut wird. Dies schließt keine Ernterückstände, organischen Nebenprodukte oder Abfälle ein. (Kaltschmitt 2009)

Durch die unterschiedlichen energetischen Nutzungsmöglichkeiten werden die Energiepflanzen folgendermaßen unterteilt:

Lignocellulosepflanzen Festbrennstoff

Ölpflanzen Ölgewinnung

Zucker- und Stärkepflanzen Ethanolproduktion (Lewandowski 2009a)

Im weiteren Verlauf werden Energiepflanzen dieser Arten genauer beschrieben.

3.2.1 Lignocellulosepflanzen

Unter Lignocellulosepflanzen werden Pflanzen verstanden, deren wesentlicher, als biogener Festbrennstoff nutzbarer Anteil aus Cellulose, Lignin und Hemicellulose besteht (Lewandowski 2009a). Zu dieser Pflanzenart zählen beispielsweise:

- schnellwachsende Baumarten
 - Weide (*Salix*)
 - Pappel (*Populus*)
- unterschiedliche Gräser
 - Chinaschilf (*Miscanthus sinensis*)
 - Rutenhirse (*Panicum virgatum*)
 - Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea L.*)
 - unterschiedliche Futtergräser
- unterschiedliche Getreideganzpflanzen
 - Weizen (*Triticum aestivum L.*)
 - Roggen (*Secale cereale L.*)
 - Triticale (*Triticosecale*)

Chinaschilf, Rutenhirse und Rohrglanzgras sind keine heimischen Pflanzen und kommen somit für die Produktion in den Vierlanden zum Schutz der Artenvielfalt, also aus nachhaltigen ökologischen Gründen, nicht in Betracht. (Lewandowski 2009a)

Schnellwachsende Baumarten

Zu den schnellwachsenden in Deutschland heimischen Baumarten zählen im wesentlichen Weiden und Pappeln, deren energieträgerrelevanten Eigenschaften in Tabelle 3.1 dargestellt sind (Lewandowski 2009a).

Tab. 3.1: Energieträgerrelevante Eigenschaften von Weiden und Pappeln

| | | |
|--------------|-----------|---|
| Heizwert | 18,5 | $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{TM}}}$ |
| Wassergehalt | 50,0 | % |
| Aschegehalt | 1,0 - 2,2 | % |

Quelle: eigene Darstellung (nach Lewandowski 2009a; Scholz et al. 2006)

3.2 Energiepflanzen

Die in Tabelle 3.1 dargestellten Daten verhalten sich bei den genannten Baumarten sehr ähnlich und unterliegen keinen großen Schwankungen. Desweiteren sind die Ansprüche, die Weiden und Pappeln an Boden sowie Klima stellen verhältnismäßig gering:

- Niederschlagsmenge über $500 \frac{\text{mm}}{\text{a}}$
- gutes Wasserspeichervermögen des Bodens, keine Staunässe
- gute Durchwurzelbarkeit des Bodens
- schwach saurer bis neutraler Boden (pH: 5,5 bis 6,5)

Zusätzlich wirkt sich die Ernte der Pflanzen in den Wintermonaten positiv auf den Wassergehalt der Pflanzen aus. Dieser ist zu diesem Zeitpunkt geringer als in den Sommermonaten. (Scholz et al. 2006; Lewandowski 2009a)

Unter Einhaltung der genannten Punkte ergibt sich ein jährlicher Biomassezuwachs, der in Tabelle 3.2 dargestellt ist.

Tab. 3.2: Durchschnittlicher jährlicher Trockenmasse-Zuwachs von Pappeln und Weiden

| Wasserversorgung | | gering | normal | hoch |
|------------------|---|--------|--------|---------|
| Pappelzuwachs | $[\frac{\text{tTM}}{\text{ha}\cdot\text{a}}]$ | 4...8 | 8...12 | 12...16 |
| Weidenzuwachs | $[\frac{\text{tTM}}{\text{ha}\cdot\text{a}}]$ | 2...5 | 5...9 | 9...14 |

Quelle: Eigene Darstellung (nach Scholz et al. 2006)

Werden die Daten aus Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 miteinander verglichen und der Energieinhalt der jährlich produzierten Trockensubstanz ermittelt, ergibt sich eine Energiemenge von:

$$\text{Energieinhalt} [\frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}}] = \text{Zuwachs} [\frac{\text{tTM}}{\text{ha}\cdot\text{a}}] \cdot \text{Heizwert} [\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}]$$

$$51.389 \frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \approx 10 \frac{\text{tTM}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 18,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Diese Energiemenge steht allerdings nicht unmittelbar zur Verfügung, da die Pflanzen in Abhängigkeit von der Erntetechnik, in unterschiedlichen Intervallen von zwischen drei bis zehn Jahren geerntet werden (Lewandowski 2009a).

Futtergräser

Zu den in Deutschland heimischen und als Energieträger nutzbaren Futtergräsern zählen beispielsweise:

- Weidelgras (*Lolium*)
- Knautgras (*Dactylis glomerata*)
- Glatthafer (*Arrhenatherum elatius*)
- Rohrschwingel (*Festuca arundinacea*)

Die Gräser weisen bei der Ernte einen Wassergehalt von 65 bis 80 % auf. Deshalb werden sie einer Feldtrocknung unterzogen, wodurch der Wassergehalt um ca. 5 % sinkt. Allerdings gehen damit Ertragsverluste von rund 10 % einher. Grund dafür ist der Verlust von Samen, da diese während der Feldtrocknung ausfallen. (Lewandowski 2009a)

Die energieträgerrelevanten Daten sind in Tabelle 3.3 zusammengefasst für die genannten Futtergräser dargestellt.

Tab. 3.3: Energieträgerrelevante Eigenschaften von Futtergräsern

| | | |
|--------------|---------|---|
| Heizwert | 16,1 | $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}_{\text{TM}}}$ |
| Wassergehalt | 60 - 75 | % |
| Aschegehalt | 5 - 10 | % |

Quelle: eigene Darstellung (nach Lewandowski 2009a; BiomasseV 2001)

Die in Tabelle 3.3 dargestellten Daten verhalten sich bei den genannten Futtergräsern sehr ähnlich und unterliegen keinen großen Schwankungen (Lewandowski 2009a).

Die Ansprüche der genannten Futtergräser an das Klima sind hingegen sehr unterschiedlich. Knautgras und Glatthafer benötigen beispielsweise nur geringe Niederschlagsmengen und eine niedrige Luftfeuchtigkeit, wohingegen das Weidelgras niederschlagsreiches und luftfeuchtes Klima bevorzugt. Rohrschwingel dagegen ist bezüglich des Klimas eher anspruchslos und übersteht auch Überschwemmungs- sowie Trockenperioden. Aus diesem Grund haben sich Grasmischungen bewährt. (Lewandowski 2009a)

Anders als die genannten schnellwachsende Baumarten benötigen Futtergräser zusätzliche Nährstoffe, die dem Boden zugeführt werden müssen. Nach Lewandowski sind dies folgende:

- Stickstoff (N) etwa $80 \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}}$
- Kalium (K) etwa $80 \frac{\text{kg}}{\text{ha} \cdot \text{a}}$

3.2 Energiepflanzen

- Phosphor (P) etwa $25 \frac{\text{kg}}{\text{ha}\cdot\text{a}}$

Unter Berücksichtigung dieser Werte ergibt sich demnach ein jährliches Ertragspotenzial von 6,4 bis $11,8 \frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}}$. (Lewandowski 2009a)

Das Ertragspotenzial ähnelt auf den ersten Blick dem schnellwachsender Holzarten. Werden die Gräser jedoch als Festbrennstoff verwertet, muss weiterhin der Heizwert berücksichtigt werden. Dieser ist in Deutschland über die „Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - BiomasseV)“ beschrieben und beträgt $16,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ (BiomasseV 2001). Somit errechnet sich eine durchschnittlich verfügbare Energiemenge von:

$$\text{Energieinhalt} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \right] = \text{Zuwachs} \left[\frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \right] \cdot \text{Heizwert} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$40.697 \frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \approx 9,1 \frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 16,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Die Energiemenge ist zwar geringer als die von Pappeln oder Weiden, dafür kann aber 3 bis 4 mal im Jahr geerntet werden, so dass diese Energiemenge jährlich zur Verfügung steht, ohne die Pflanzen über mehrere Jahre lagern zu müssen. (Lewandowski 2009a).

Getreideganzpflanzen

Zu den Getreidearten die als Energieträger dienen zählen beispielsweise:

- Weizen (*Triticum aestivum* L.)
- Roggen (*Secale cereale* L.)
- Triticale (*Triticosecale*)

Die Getreidesorten werden den Winter- und Sommerformen zugeordnet. Der Unterschied ist der Zeitpunkt der Saat. Winterformen werden im Herbst gesät, da sie eine Vernalisation (Kälteperiode) zur Keimung benötigen. Sommerformen werden im Frühjahr gesät. Grundsätzlich ist der Energieinhalt der Winterformen höher, da sie länger auf dem Feld wachsen als Sommerformen. Die energieträgerrelevanten Eigenschaften der Winterformen sind dennoch sehr ähnlich und werden daher in Tabelle 3.4 zusammengefasst dargestellt. (Lewandowski 2009a)

3.2 Energiepflanzen

Tab. 3.4: Energieträgerrelevante Eigenschaften von Weizen, Roggen und Triticale

| | Stroh | Korn | |
|--------------|-------------|------------|-------------------------------|
| Heizwert | 16,5 | | $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ |
| Wassergehalt | 10,0 - 40,0 | 9,0 - 20,0 | % |
| Aschegehalt | 3,0 - 7,5 | 1,2 - 1,7 | % |

Quelle: eigene Darstellung (nach Lewandowski 2009a; BiomasseV 2001)

Der Wassergehalt schwankt je nach Erntezeitpunkt. Grundsätzlich gilt: je später die Ernte, desto geringer der Wasseranteil. Zusätzlich muss bei den Eigenschaften zwischen Stroh und Korn unterschieden werden, da sich die Gehalte der Inhaltsstoffe zum Teil stark unterscheiden. (Lewandowski 2009a)

Der Ertrag, der sich jährlich auf einen Hektar Anbaufläche bezieht ist in der Tabelle 3.5 dargestellt.

Tab. 3.5: Durchschnittlicher Trockenmasse-Zuwachs von Weizen, Roggen und Triticale

| | | Ertrag $[\frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}}]$ | | |
|-----------------|-------|--|------------|------------|
| | | gering | mittel | hoch |
| Sommerweizen | Stroh | 3,3 - 7,0 | 5,5 - 8,4 | 6,8 - 11,9 |
| | Korn | 3,0 - 5,0 | 5,0 - 6,0 | 6,0 - 8,5 |
| Winterweizen | Stroh | 4,4 - 8,4 | 6,6 - 10,5 | 8,3 - 13,3 |
| | Korn | 4,0 - 6,0 | 6,0 - 7,5 | 7,5 - 9,5 |
| Winterroggen | Stroh | 3,9 - 6,8 | 5,9 - 8,3 | 7,2 - 12,8 |
| | Korn | 3,0 - 4,5 | 4,5 - 5,5 | 5,5 - 8,5 |
| Wintertriticale | Stroh | 4,2 - 7,0 | 6,0 - 8,4 | 7,2 - 12,6 |
| | Korn | 3,5 - 5,0 | 5,0 - 6,0 | 6,0 - 9,0 |

Quelle: eigene Darstellung (nach Lewandowski 2009a)

Wird den Mittelwerten der Daten aus Tabelle 3.4 der Heizwert der Getreideganzpflanzen hinzugerechnet ergeben sich folgende Energieinhalte der einzelnen Energieträger:

$$\text{Energieinhalt} [\frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}}] = (\text{Zuwachs}_{\text{Stroh}} + \text{Zuwachs}_{\text{Korn}}) [\frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}}] \cdot \text{Heizwert} [\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}]$$

$$\text{Sommerweizen: } 57.062 \frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \approx (6,95 + 5,5) \frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 16,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Winterweizen: } 70.125 \frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \approx (8,55 + 6,75) \frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 16,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Winterroggen: } 55.458 \frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \approx (7,1 + 5,0) \frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 16,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Wintertriticale: } 58.208 \frac{\text{kWh}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \approx (7,2 + 5,5) \frac{\text{t}_{\text{TM}}}{\text{ha}\cdot\text{a}} \cdot 16,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Demnach weist der Winterweizen den höchsten Energieinhalt auf, und der Winterroggen den geringsten. Der Wintertriticale liegt dazwischen. Grund dafür ist, dass die Wintertriticale eine Mischung aus Winterweizen und Winterroggen ist. Sie wurde gezüchtet, um die hohe Energiemenge des Winterweizens mit den verhältnismäßig geringen Ansprüchen des Winterroggens zu kombinieren. Dennoch ist der Triticale, im Vergleich zu anderen Energiepflanzen, krankheitsanfälliger. Um Ertragsminderungen durch Krankheits- oder Schädlingsbefall zu minimieren, muss daher auf Pflanzenschutzmittel zurückgegriffen werden. Der Produktionsmittelaufwand von der Saat des Getreides bis zu einem Festbrennstoff ist daher nach Lewandowski für eine Energiepflanzenproduktion zu aufwändig. Zudem lässt sich der hohe Einsatz von Pflanzenschutzmitteln mit den Bedingungen der Nachhaltigkeit nicht vereinbaren. (Lewandowski 2009a)

3.2.2 Ölpflanzen

Unter Ölpflanzen werden Pflanzen verstanden, deren Früchte und Samen stark fetthaltig sind. Zu dieser Pflanzenart zählen beispielsweise:

- Kreuzblütler:
 - Raps (*Brassica napus*)
 - Rübsen (*Brassica rapa*)
 - Ölrettich (*Raphanus sativus var. oleiformis*)
 - Senf (*Sinapis*)
 - Leindotter (*Camelina sativa*)
 - Krambe (*Crambe abyssinica*)
- Korbblütler:
 - Sonnenblume (*Helianthus annuus*)
 - Saflor (*Carthamus tinctorius*)
- Hanfgewächse (*Cannabaceae*)
- Hülsenfrüchte (*Leguminosae*)
- Lippenblütler (*Lamiaceae*)
- Doldengewächse (*Apiaceae*)

Um diese Pflanzenarten energetisch nutzen zu können, ist ein möglichst hoher Ölertrag von Bedeutung. In Deutschland kommen von den genannten Pflanzen nur der Winterraps und die Sonnenblume in Betracht, da diese speziell auf einen hohen Ölertrag gezüchtet wurden. Beide werden im folgenden vorgestellt. (Lewandowski 2009a)

Winterraps

Die bis zu 1,8 m hoch wachsenden Pflanzen haben lockere Trauben als Blüten. An diesen bilden sich 5 bis 10 cm lange Schoten, in denen die Samen sitzen, aus denen das Öl gewonnen wird. (Lewandowski 2009a)

Die energieträgerrelevante Eigenschaften von Rapsöl sind in Tabelle 3.6 dargestellt.

Tab. 3.6: Energieträgerrelevante Eigenschaften von Rapsöl

| | | |
|--------------------|---------|--------------------------------|
| Heizwert | 37,6 | $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ |
| Dichte | 920 | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Ölgehalt der Samen | 40 - 45 | % |

Quelle: eigene Darstellung (nach Lewandowski 2009a; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012a)

Der Ölgehalt der Samen aus Tabelle 3.6 liegt zwischen 40 und 45 %. Allerdings ist die Zusammensetzung des Öls nicht nur von der Art des Winterrapses abhängig, sondern auch von folgenden Faktoren:

- Gesamtverschmutzung; abhängig von Unkraut oder Mähdrusch
- pH-Wert, Phosphor-, Magnesium- und Chlorgehalt; abhängig von Erntezeitpunkt
- Oxidationsstabilität; abhängig von Bruchkorn und Reinigung

Zusätzlich benötigt Raps eine Anbaupause von drei bis vier Jahren, um Krankheiten zu minimieren. Hierdurch werden Pilzkrankheiten vermieden. Der Befall von Schädlingen muss allerdings noch durch Saatgutbehandlungen und Insektizide bekämpft werden. Desweiteren hat Winterraps im Vergleich zu anderen Energiepflanzen einen hohen Stickstoffbedarf. (Lewandowski 2009a)

Bei gutem Wuchs können so alle drei bis vier Jahre 2,8 bis 4,8 $\frac{\text{t}}{\text{ha}}$ Korn geerntet werden, aus dem 1.100 bis 2.000 kg Öl gewonnen werden kann. (Lewandowski 2009a)

Das entspricht einer jährlichen Energiemenge von:

$$\text{Energieinhalt} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] = \frac{\text{Ölmenge} \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right] \cdot \text{Heizwert} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]}{3,5 \text{ a}}$$

$$4.625 \frac{\text{kWh}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \approx \frac{1.550 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \cdot 37,6 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}{3,5 \text{ a}}$$

Aufgrund der geringen Energiemenge, dem Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und einem verhältnismäßig hohem Stickstoffbedarf ist der Anbau dieser Pflanze, dessen Öl-Gewinnung und anschließende Verbrennung zur Deckung des Wärmebedarfes, nicht geeignet. (Lewandowski 2009a)

Sonnenblume

Die Blüten der bis zu zwei Meter hoch wachsenden Pflanzen sind in runden Blütenböden eingebettet. Sie blühen etwa zwei bis drei Wochen. In dieser Zeit findet auch die Bestäubung durch Insekten statt. Aus den so entstehenden Achänen (Samen der Sonnenblume) wird letztendlich das Öl gewonnen. (Lewandowski 2009a)

Die energieträgerrelevanten Eigenschaften von Sonnenblumenöl sind in Tabelle 3.7 dargestellt

Tab. 3.7: Energieträgerrelevante Eigenschaften von Sonnenblumenöl

| | | |
|----------------------|---------|--------------------------------|
| Heizwert | 37,1 | $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ |
| Dichte | 920 | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Ölgehalt der Achänen | 35 - 60 | % |

Quelle: eigene Darstellung (nach Lewandowski 2009a; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012a)

Der Ölgehalt der Achänen liegt zwischen 35 und 60 %. Die hohe Differenz des Ölgehalts liegt daran, dass die Samen mit und ohne Schale extrahiert werden können. Allerdings ist auch bei dem Ölertrag der Sonnenblume mit großen Schwankungen zu rechnen, da sie hohen Temperaturanforderungen unterliegt und eine ausreichende Wasserversorgung gewährleisten muss. Die optimalen klimatischen Voraussetzungen die in der 150 Tage andauernden Vegetationsperiode vorherrschen sollten sind folgende:

- kein Frost
- Summe der Tagesmitteltemperaturen über 6 °C mindestens 1.500 °C
- Niederschlagsmenge zwischen 300 und 500 mm

Desweiteren werden Spätfröste von den Jungpflanzen nur bis -5 °C vertragen. Während der Erntezeit sollte zudem trockenes Wetter herrschen, damit die Blütenböden austrocknen können und nicht zu faulen beginnen. Durch zu hohe Temperaturen sinkt allerdings der Ölgehalt, besonders wenn diese mit Wassermangel verbunden sind. (Lewandowski 2009a)

Die mögliche Vegetationsperiode innerhalb eines Jahres ist aus Abbildung 3.3 ersichtlich.

3.2 Energiepflanzen

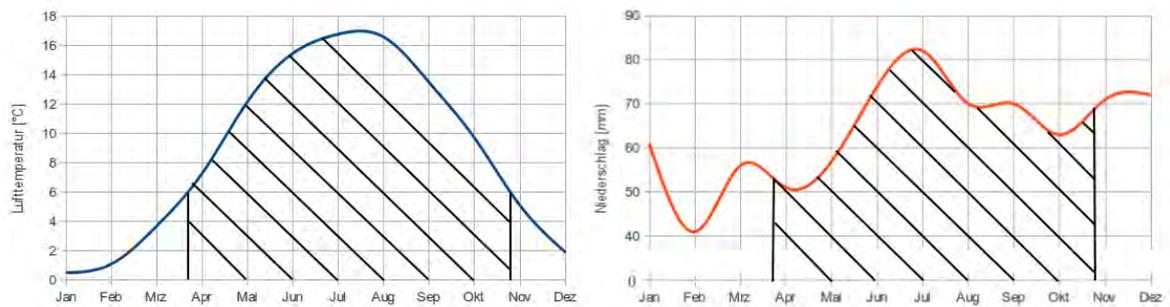


Abb. 3.3: Zeitraum einer möglichen Vegetationsperiode der Sonnenblume über Lufttemperatur und Niederschlag

Quelle: Eigene Darstellung (nach Deutscher Wetterdienst 2007)

Der schraffierte Bereich in Abbildung 3.3 zeigt den Zeitraum in dem die Vegetation von Sonnenblumen möglich ist. Dieser liegt zwischen Ende März bis Ende Oktober und umfasst ca. 215 Tage. In dieser Zeit wird eine Summe von 1.500 °C über 150 Tage zu jeder Zeit erreicht. Der Wasserbedarf in dieser Zeit ist ebenfalls ausreichend. Allerdings ist eine trockene Erntezeit durch die hohen Niederschlagsmengen am Ende dieses Zeitraumes durchaus fragwürdig. (Deutscher Wetterdienst 2007)

Desweiteren benötigen Sonnenblumen, ebenso wie Raps, eine Anbaupause. Diese sollte vier Jahre betragen. So lassen sich alle vier Jahre 2,4 bis 4,0 $\frac{t}{ha}$ Korn ernten, aus dem eine Ölmenge von 850 bis 2.000 kg gewonnen werden kann. (Lewandowski 2009a)

Das entspricht einer jährlichen Energiemenge von:

$$\text{Energieinhalt} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] = \frac{\text{Ölmenge} \left[\frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right] \cdot \text{Heizwert} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right]}{4 \text{ a}}$$

$$3.671 \frac{\text{kWh}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \approx \frac{1.425 \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \cdot 37,1 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}}{4 \text{ a}}$$

Durch den geringen Energieinhalt und unter Berücksichtigung von Ernteaussfällen durch Niederschläge während der Erntezeit, ist der Anbau von Sonnenblumen zur Deckung des Heizenergiebedarfes nicht geeignet.

3.2.3 Zucker- und Stärkepflanzen

Zur Gewinnung von Bioethanol werden Zucker- und Stärkepflanzen verwendet. Zu den Zuckerpflanzen, die einen technisch nutzbaren Zuckeranteil aufweisen und in Deutschland anbaubar sind, zählen Zuckerrüben (*Beta vulgaris*) und Zuckerhirse (*Sorghum bicolor*). Großtechnisch wird in Deutschland jedoch nur die Zuckerrübe angebaut. Die Zuckerhirse ist eine in Deutschland nicht heimische Pflanze. Sie ist tropischer Herkunft und somit unter den Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit für den Standort der Vier- und Marschlande nicht

3.2 Energiepflanzen

geeignet. Zu den Stärkepflanzen, die einen technisch nutzbaren Stärkeanteil aufweisen und in Deutschland anbaubar sind zählen beispielsweise:

- Kartoffel (*Solanum tuberosum*)
- Getreide
- Mais (*Zea mays*)
- Topinambur (*Helianthus tuberosus*)

Getreidesorten mit einer möglichst hohen Kornausbeute müssen mit intensiven Fungizideinsatz produziert werden und kommen daher nicht in Betracht. Der Körnermaisbau konzentriert sich in Deutschland auf den Süden und das Rheintal, da von Mai bis September Durchschnittstemperaturen von mindestens 13,5 °C und eine Sonnenscheindauer von mindestens 900 Stunden benötigt werden. Topinambur hingegen ist, wie die Zuckerhirse, in Deutschland nicht heimisch. (Lewandowski 2009a)

Als Zuckerpflanze kommt also lediglich die Zuckerrübe und als Stärkepflanze lediglich die Kartoffel in Betracht. Beide werden im folgendem beschrieben.

Zuckerrübe

Die Zuckerrübe gehört zu der Familie der Gänsefußgewächse. Ihr Zuckergehalt ist in der verdickten Primärwurzel und in einem Teil des blättertragenden Kopfes zu finden, wobei der größte Zuckeranteil im Zentrum der Rüben enthalten ist. (Lewandowski 2009a)

Die energieträgerrelevanten Eigenschaften sind in Tabelle 3.8 dargestellt.

Tab. 3.8: Energieträgerrelevante Eigenschaften von Ethanol aus Zuckerrüben

| | | |
|------------------------|---------|--------------------------------|
| Heizwert | 26,7 | $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ |
| Dichte | 790 | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Zuckergehalt der Rüben | 68 - 82 | % _{TM} |
| Wassergehalt der Rüben | 74 - 82 | % |

Quelle: eigene Darstellung (nach Lewandowski 2009a; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012a)

Der Zuckergehalt aus Tabelle 3.8 bezieht sich auf die Trockenmasse. Um den Gehalt von 68 bis 82 % zu erzielen benötigt die Zuckerrübe ein recht warmes Klima. Folgende Punkte sind für einen hohen Zuckerertrag von Bedeutung:

- Tagestemperaturen von 20 bis 23 °C
- Temperatur zur Keimung von mindestens 5 °C

3.2 Energiepflanzen

- Temperatur nicht unter -5 °C für Jungpflanzen

Zusätzlich sollte der Boden tiefgründig und gleichmäßig strukturiert sein und es sollte eine Fruchtfolge von 25 bis 33 % eingehalten werden, um Krankheiten zu minimieren. Ein Anbau ist also nur ca. alle drei Jahre möglich. (Lewandowski 2009a)

Werden diese Anforderungen erfüllt, können ab Anfang Oktober alle drei Jahre etwa 58 $\frac{t}{ha}$ Zuckerrüben geerntet werden. Das entspricht einer Zuckermenge von 9 $\frac{t}{ha}$, was wiederum einem Ethanolertrag von 5.000 bis 5.750 $\frac{l}{ha}$ darstellt. (Lewandowski 2009a)

Dies entspricht einer jährlichen Energiemenge von:

$$\text{Energieinhalt} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \right] = \frac{\text{Ethanolertrag} \left[\frac{l}{\text{ha}} \right] \cdot \text{Heizwert} \left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right] \cdot \rho \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{3 \text{ a}}$$

$$10.498 \frac{\text{kWh}}{\text{ha} \cdot \text{a}} \approx \frac{5.375 \frac{l}{\text{ha}} \cdot 26,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{3 \text{ a}}$$

Durch den im Verhältnis zu anderen Energiepflanzen geringen Energieinhalt ist der Aufwand, der betrieben werden muss, um etwa alle drei Jahre Ethanol zu gewinnen zu aufwändig, um den Heizenergiebedarf zu decken. (Lewandowski 2009a)

Desweiteren können in Hamburg die hohen Zuckergehalte nicht erreicht werden, da anhand der Daten des deutschen Wetterdienstes ersichtlich ist, dass keine Tagestemperaturen von 20 bis 23 °C erreicht werden. Der Energieinhalt fällt demnach noch geringer als angegeben aus. (Deutscher Wetterdienst 2007)

Kartoffel

Kartoffeln gehören der Familie der Nachtschattengewächse an. Die stärkehaltigen Knollen bilden sich an unterirdischen Ausläufern. (Lewandowski 2009a)

Die energieträgerrelevanten Daten der Knollen sind in Tabelle 3.9 dargestellt.

Tab. 3.9: Energieträgerrelevante Eigenschaften von Ethanol aus Kartoffeln

| | | |
|--------------------------|---------|--------------------------------|
| Heizwert | 26,7 | $\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ |
| Dichte | 790 | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Stärkegehalt der Knollen | 15 - 21 | % |
| Wassergehalt der Knollen | 74 - 82 | % |

Quelle: eigene Darstellung (nach Lewandowski 2009a; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012a)

Der Stärkegehalt aus Tabelle 3.9 von 15 bis 21 % ist ebenso wie der Zuckergehalt der Zuckerrübe von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Beispielsweise beläuft sich der Stärkeverlust durch Lagerung auf 8 % nach sechs Monaten und bereits nach acht Monaten auf 16,5 %. Folgende weitere Faktoren beeinflussen den Ernteertrag sowie Stärkegehalt der Knollen:

3.2 Energiepflanzen

- Locker und gut durchlüfteter Boden
- Warme Frühjahrswitterung zur Förderung des Knollenansatzes
- Kühler Sommer mit möglichst hoher solarer Einstrahlung

Desweiteren benötigen Kartoffeln eine Anbaupause von vier bis fünf Jahren, um die Eigenschaften des Bodens durch andere Anpflanzungen wieder herzustellen. (Lewandowski 2009a)

Unter Berücksichtigung dieser Punkte haben Kartoffeln alle vier bis fünf Jahre einen Knollenertrag von ca. 33 bis 50 $\frac{t}{ha}$. Das entspricht einer Stärkemenge von 5,6 bis 9,6 $\frac{t}{ha}$ oder einem Ethanolertrag von 3.500 bis 6.600 $\frac{l}{ha}$. (Lewandowski 2009a)

Dies entspricht einer jährlichen Energiemenge von:

$$\text{Energieinhalt} \left[\frac{kWh}{ha \cdot a} \right] = \frac{\text{Ethanolertrag} \left[\frac{l}{ha} \right] \cdot \text{Heizwert} \left[\frac{MJ}{kg} \right] \cdot \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{4,5 \text{ a}}$$

$$6.575 \frac{kWh}{ha \cdot a} \approx \frac{5.050 \frac{l}{ha} \cdot 26,7 \frac{MJ}{kg} \cdot 790 \frac{kg}{m^3}}{4,5 \text{ a}}$$

Durch den geringen Energieinhalt, den Ertragsausfällen durch die notwendige lange Lagerung, ist der Aufwand zu hoch, um das gewonnene Ethanol für Heizenergiezwecke zu verbrennen.

3.2.4 Geeignete Energiepflanzen

Zusammenfassend eignen sich für die Beheizung der Gewächshäuser des Gartenbaubetriebes Pappeln, Weiden und Futtergräser. Der jährliche Zuwachs sowie die daraus resultierenden jährlich gespeicherten Energiemengen der Trockenmasse sind in Tabelle 3.10 dargestellt.

Tab. 3.10: Energieträgerrelevante Daten von Pappeln, Weiden und Futtergräsern

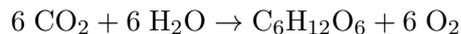
| Energiepflanze | Zuwachs $\left[\frac{t_{TM}}{ha \cdot a} \right]$ | Energiemenge $\left[\frac{kWh}{ha \cdot a} \right]$ | Wassergehalt [%] | Aschegehalt [%] |
|----------------|---|---|---------------------|--------------------|
| Pappeln | 10 | 51.389 | 50 | 1,0 - 2,2 |
| Weiden | 7 | 35.972 | 50 | 1,0 - 2,2 |
| Futtergräser | 9 | 40.250 | 60 - 75 | 5,0 - 10,0 |

Quelle: Eigene Darstellung (nach Scholz et al. 2006; Lewandowski 2009a; BiomasseV 2001)

Zu erkennen ist, dass Pappeln den größten jährlichen Zuwachs haben. Mit einer Energiemenge von 51.389 $\frac{kWh}{ha}$ im Jahr ist auch diese am höchsten. Dennoch wird in der weiteren Betrachtung auch auf Weiden und Futtergräser eingegangen. Der Hintergrund ist, dass alle aufgeführten Energiepflanzen unter den Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit in den Vier- und Marschlanden produziert werden können.

3.3 Umwandlungs- und Veredelungsprozesse in Bezug auf Energiepflanzen

Durch den Prozess der Photosynthese wird Kohlenstoffdioxid und Wasser in Glukose und Sauerstoff assimiliert. Die benötigte Energie liefert hierbei die Sonne:



Solare Strahlungsenergie wird also in chemische Energie umgewandelt und durch die Glukose gespeichert. Diese dient der Pflanze wiederum als Ausgangsstoff für den Baustoffwechsel und der Atmung. (Lewandowski 2009b)

Um die Energie technisch nutzen zu können muss sie zunächst noch umgewandelt oder veredelt werden. Hierfür kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht. Beispielsweise kann die Pflanze direkt verbrannt und so Wärmeenergie bereitgestellt werden. Durch verschiedene Umwandlungs- und Veredelungsprozesse kann sie aber auch zu einem höherwertigen Energieträger umgewandelt werden. Diese Prozesse sind in drei Kategorien unterteilt, was Abbildung 3.4 verdeutlicht.

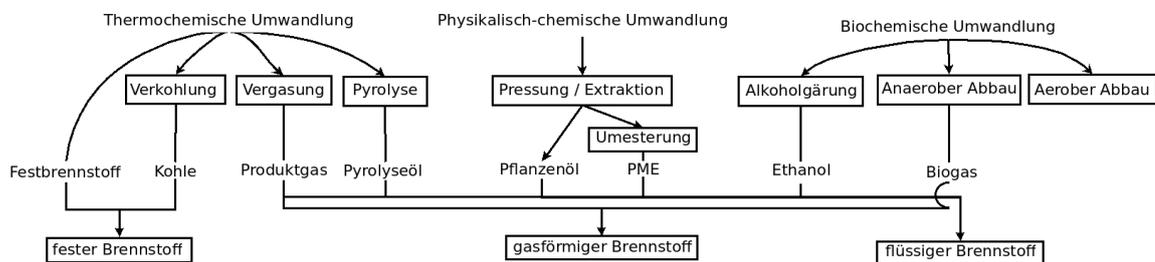


Abb. 3.4: Schematischer Aufbau der unterschiedlichen Veredelungsmöglichkeiten von Biomasse zur Bereitstellung verschiedenförmiger Brennstoffe

Quelle: eigene Darstellung (nach Kaltschmitt 2009)

Den in Abbildung 3.4 dargestellten Umwandlungsprozessen können die unterschiedlichen Energiepflanzen zugeordnet werden. So werden bei der biochemische Umwandlung vornehmlich Zucker- und Stärkepflanzen genutzt, um aus deren Zucker- bzw. Stärkeanteilen Ethanol zu gewinnen. Durch die physikalisch-chemische Umwandlung wird aus den Ölannteilen der Ölpflanzen Öl gewonnen. Die thermochemische Umwandlung dient vornehmlich der Wärmebereitstellung durch die direkte Verbrennung von Lignocellulosepflanzen. Desweiteren kann der Verbrennungsprozess (siehe Abschnitt 3.4) auch nur teilweise erfolgen, um die Zwischenprodukte (Kohle, Produktgas und Pyrolyseöl), die bei der Verbrennung entstehen, zu einem späteren Zeitpunkt nutzen zu können. (Seen 2009; Widmann et al. 2009)

Die biochemische- und physikalisch-chemische Umwandlung nutzt Prozesse, die die feste Biomasse in flüssige oder gasförmige Energieträger überführen. Diese Brennstoffe dienen vornehmlich der Nutzung als Kraftstoff. Sie werden also nicht genutzt um Gebäude zu beheizen, sondern sie in kinetische Energie und eventuell weiter in Strom umzuwandeln. (Seen 2009; Widmann et al. 2009)

Unter diesen Gesichtspunkten und da in den Vier- und Marschlanden ausschließlich Lignocellulosepflanzen unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit sinnvoll angebaut werden können, kommt somit nur die direkte thermo-chemische Umwandlung und hierbei vornehmlich die Festbrennstoffnutzung in Betracht, die im Folgenden beschrieben wird.

3.4 Verbrennung

Bei der Verbrennung werden Kohlenstoff und Wasserstoff zu Kohlenstoffdioxid und Wasser oxidiert. Hierbei wird Energie in Form von Wärme freigesetzt, die zum Beheizen der Gewächshäuser eingesetzt wird. Grundsätzlich läuft die vollständige Verbrennung in vier Phasen ab, die in Abbildung 3.5 dargestellt sind. (Hartmann et al. 2009)

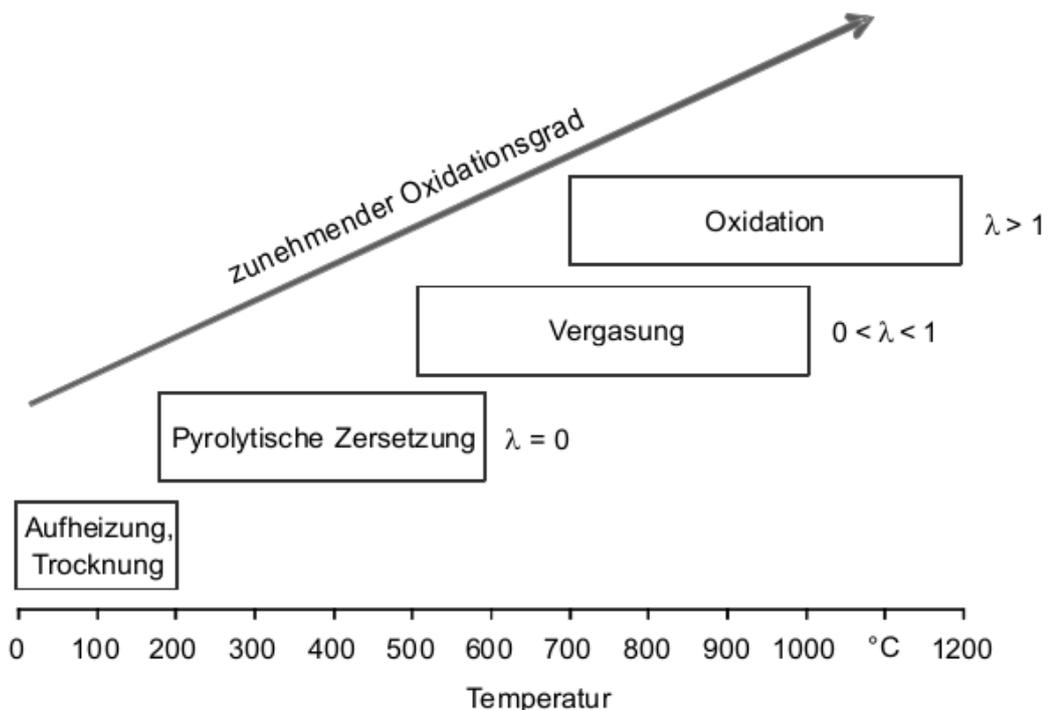


Abb. 3.5: Phasen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe

Quelle: (Hartmann et al. 2009)

Die Phasen unterscheiden sich durch die physikalischen und chemischen Reaktionen, dem Temperaturniveau und dem von außen zugeführten Sauerstoff. Der Sauerstoff wird über die Luftüberschusszahl λ beschrieben. Sie ist wie folgt definiert:

$$\lambda = \frac{m_{Luft,ges}}{m_{Luft,min}}$$

λ : Luftüberschusszahl

$m_{Luft,ges}$: insgesamt zugeführte Luftmenge für den Oxidationsvorgang

$m_{Luft,min}$: stöchiometrisch minimal benötigte Luftmenge für die vollständige Oxidation

Der pyrolytischen Zersetzung wird demnach kein Sauerstoff zugeführt ($\lambda = 0$), der Vergasung weniger als eine für eine vollständige Oxidation nötige Menge ($0 < \lambda < 1$) und der Oxidation mehr als benötigt wird ($\lambda \geq 1$).

Im Folgendem werden die Teilabschnitte der vollständigen Oxidation genauer beschrieben.

3.4.1 Aufheizung, Trocknung

Der endotherme (unter Energiezufuhr) Prozess läuft bei Temperaturen von bis zu 200 °C ab. Hierbei wird das Wasser verdampft, das sich in der porösen Struktur der Brennstoffe frei und in der organischen Masse gebunden befindet. Die organische Masse bleibt bei diesen Temperaturen noch weitgehend unberührt, da der Temperaturanstieg des Brennstoffs, durch die hohe Verdampfungsenthalpie von Wasser, herabgesetzt wird. Desweiteren treten durch die Aufheizung Spannungen in der Struktur des Brennstoffes auf, die zu Rissbildungen führen können. Die direkt zugängliche Oberfläche wird also vergrößert, wodurch sich der Temperatenausgleich und der Trocknungsprozess schneller einstellen können. Ebenso verringert sich die Masse des Brennstoffes, da das Wasser in Form von Dampf austritt. (Hartmann et al. 2009)

3.4.2 Pyrolytische Zersetzung

Unter pyrolytischer Zersetzung wird das Aufbrechen von Makromolekülen durch Wärmezufuhr von bis zu 500 °C verstanden. Dieser Vorgang findet unter Sauerstoffausschluss statt, selbst wenn Sauerstoff in der Atmosphäre um den Brennstoff vorhanden ist. Das liegt daran, dass der Sauerstoff nicht an die Partikel des Brennstoffs gelangen kann, da die Zersetzungsprodukte (Gase und Dämpfe) aus den Partikeln nach außen strömen. Als Rückstand nach diesem Prozess bleibt Holzkohle und Asche zurück. 80 bis 85 % des Brennstoffs gehen allerdings in die Gasphase über. Diese Gase können auskondensiert und als Pyrolyseöl genutzt werden. (Hartmann et al. 2009)

3.4.3 Vergasung

Die Vergasung ist der nächste Schritt einer vollständigen Oxidation von biogenen Festbrennstoffen. Anders als die pyrolytische Zersetzung finden zwei Reaktionen unter Sauerstoffzufuhr statt. Die Luftüberschusszahl liegt dabei zwischen 0 und 1. Desweiteren laufen die Prozesse bei deutlich höheren Temperaturen ab. Die erste Reaktion ist die partielle Oxidation. Hierbei reagieren die festen, flüssigen und gasförmigen Produkte aus der pyrolytischen Zersetzung mit Sauerstoff, was die Temperatur auf über 700 °C ansteigen lässt. Durch diese exotherme (unter Energieabgabe) Reaktion, wird die erforderliche Wärme für die beiden endothermen Prozesse (Aufheizung, Trocknung und pyrolytische Zersetzung) bereitgestellt. Ein Teil der Produkte aus dieser Oxidation werden anschließend am festen Kohlenstoff (Kohle aus der pyrolytischen Zersetzung) zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff reduziert. (Hartmann et al. 2009)

Durch die pyrolytische Zersetzung und die Vergasung entsteht ein Gasgemisch, das als Hauptkomponenten folgende Stoffe aufweist:

- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Kohlenstoffdioxid (CO₂)
- Wasserstoff (H₂)
- Methan (CH₄)
- Wasserdampf (H₂O)
- Stickstoff (N₂) (falls Luft anstatt reiner Sauerstoff zugeführt wird)

Zusätzlich zu diesem Produktgas bleiben noch Teere, Asche und Staub zurück. (Hartmann et al. 2009)

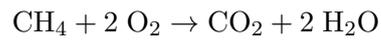
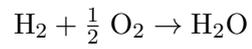
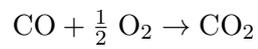
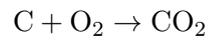
3.4.4 Oxidation

Die letzte Phase der vollständigen Verbrennung stellt die Oxidation dar. Die Produkte der pyrolytischen Zersetzung und der Vergasung werden unter Sauerstoffzufuhr vollständig oxidiert. Damit eine vollständige Oxidation ablaufen kann, müssen folgende Punkte sichergestellt werden:

- Luftüberschusszahl $\lambda \geq 1$
- hohe Temperatur
- Vermischung von Verbrennungsgasen und Verbrennungsluft
- ausreichende Zeit für ablaufende Reaktionen (Hartmann et al. 2009)

3.4 Verbrennung

Werden diese Punkte erfüllt, laufen folgende Oxidationsreaktionen ab:



Als Reaktionsprodukte bilden sich im Wesentlichen Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf. Die durch diese Oxidation freigesetzte Wärme dient anschließend zum Beheizen der Gewächshäuser. (Hartmann et al. 2009)

4 Betriebsbeschreibung

Der Gartenbaubetrieb wird aus betriebswirtschaftlichen Gründen anonymisiert dargestellt. Er befindet sich in den Vierlanden in Hamburg und produziert Gerbera-Pflanzen als Schnittblumen für den Großmarkt. Im weiteren Verlauf werden die relevanten Daten für die Beheizung der Gewächshausfläche aufgeführt. Der IST-Zustand wird ebenso wie die dafür benötigten Mengen des Energieträgers dargestellt.

4.1 IST-Zustand

Aufgrund fehlender Messtechnik, werden energieträgerrelevante Daten nur jährlich und unvollständig aufgenommen. Die vorhandenen Daten sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tab. 4.1: IST-Zustand

| | | |
|-------------------------------|-------|------------------|
| Gewächshäuser | | |
| Fläche | 7.000 | m ² |
| Jahresdurchschnittstemperatur | 14 | °C |
| Anthrazitkohle | | |
| Menge | 350 | $\frac{t}{a}$ |
| Heizwert | 9 | $\frac{kWh}{kg}$ |
| Schüttdichte | 790 | $\frac{kg}{m^3}$ |
| Kosten | 210 | $\frac{€}{t}$ |

Quelle: Eigene Darstellung (Kohle siehe Anhang)

Der jährlich benötigte Energiebedarf zur Beheizung der Gewächshausfläche von 7.000 m² auf 14 °C wird zur Zeit durch 350 t Anthrazitkohle im Jahr gewährleistet. Diese stammt aus dem Betrieb „RAG Anthrazit Ibbenbüren GmbH“ (siehe Anhang). Die Anthrazitkohle wird in einer Feuerung, die das ganze Jahr in Betrieb ist, verbrannt.

Im weiteren Verlauf wird der Energiebedarf ermittelt, der für die Gewächshausbeheizung bereitgestellt werden muss. Des weiteren werden anhand dieser Daten, die Verluste der Feuerung sowie Zuführung der Wärmeenergie zu den Gewächshäusern beschrieben, um über diese den benötigten Leistungsbereich der neuen Feuerung festzulegen.

4.2 Energiebedarf

Nicht nur der Dämmwert der Außenflächen sowie der Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außentemperatur fließen in die Berechnung des Energiebedarfs mit ein. Die eingestrahelte solare Strahlung hat ebenfalls einen großen Einfluss. Folgende Abbildung 4.1 verdeutlicht die Auswirkungen der solaren Strahlung auf eine Gewächshausfläche.

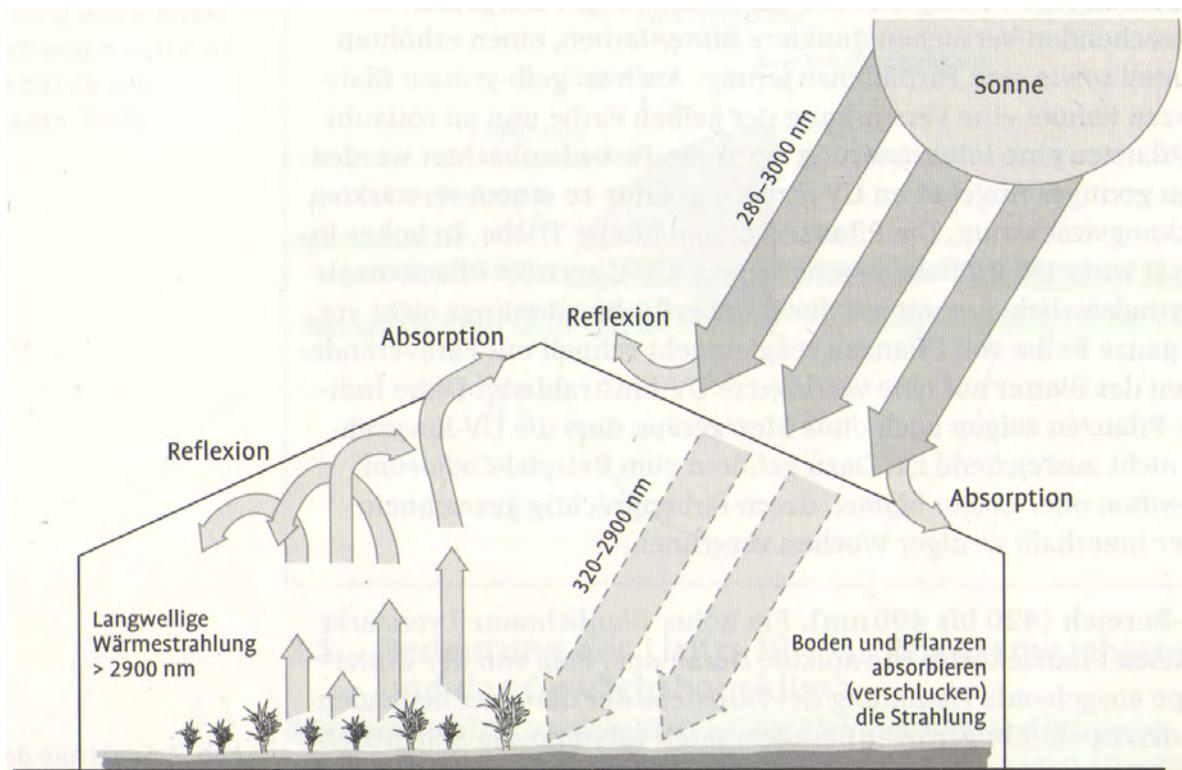


Abb. 4.1: Einfluss der solaren Strahlung auf den Wärmebedarf

Quelle: (Schrader & Dietrich 2011)

Die Sonnenstrahlung wird von der Gewächshausfläche reflektiert, absorbiert und transmittiert. Der reflektierte Anteil hat keine Auswirkungen auf das Klima im Gewächshaus. Der absorbierte Anteil erwärmt die Gewächshausfläche, die anschließend Wärmestrahlung nach Innen und Außen abgibt. Der transmittierte Anteil wird vom Boden und den Pflanzen absorbiert, die ebenfalls die Strahlung in Form von Wärme abgeben. Aus diesen Gründen haben sich bei der Berechnung des Wärmebedarfs im Unterglasgartenbau die Tabellen von Damrath bewährt.

Die Tabelle von Hamburg dient als Berechnungsgrundlage für den jährlichen Energiebedarf zur Gewächshausbeheizung des Betriebes. Da die Tabellen von 1982 sind, wird weiterhin von einer Absorptionsverbesserung der Außenflächen von 30 % ausgegangen. Unter

4.3 Anthrazitkohlebedarf

Zuhilfenahme dieser Tabelle (siehe Anhang) wird der jährliche Energiebedarf wie folgt berechnet:

$$\Delta Q_{\text{Gewächshaus}} = \Delta q \cdot A$$

$$2.762 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} = 394,53 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}} \cdot 7.000 \text{m}^2$$

$\Delta Q_{\text{Gewächshaus}}$: zugeführter (benötigter) Energiebedarf der Gewächshäuser [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

Δq : spezifischer zugeführter (benötigter) Energiebedarf [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{a}}$]

A : Fläche der Gewächshäuser [m^2]

Damit die Jahresmitteltemperatur von 14 °C auf den 7.000 m² eingehalten werden kann, müssen folglich jedes Jahr 2.762 MWh Wärmeenergie zugeführt werden.

4.3 Anthrazitkohlebedarf

Die 2.762 MWh Wärmeenergie werden durch das Verbrennen der Anthrazitkohle in der Feuerung erreicht. Hierfür werden rund 350 t Kohle in einer Feuerungsanlage verbrannt. Diese hat einen Heizwert von 9 $\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$. Das entspricht einer Jahresenergiemenge von:

$$\Delta Q_{\text{Kohle}} = m \cdot H_{\text{Kohle}}$$

$$3.150 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} = 350 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

ΔQ_{Kohle} : zugeführter (benötigter) Energiebedarf der Kohle [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

m : Masse der jährliche benötigten Kohle [$\frac{\text{kg}}{\text{a}}$]

H_{Kohle} : Heizwert der Kohle [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$]

Die Energiemenge, die in der Kohle enthalten ist, beträgt demnach 3.150 $\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$, welches einer Differenz von 388 $\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ zu der benötigten Energiemenge von 2.762 $\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ entspricht. Dies sind die Verluste, die durch die Verbrennung des Brennstoffes und den Zuführungen der Wärme zu den Gewächshäusern entstehen. Die Verluste werden über den Wirkungsgrad der Feuerung und Zuführungen beschrieben und errechnet sich wie folgt:

$$\eta = \frac{\Delta Q_{\text{Gewächshaus}}}{\Delta Q_{\text{Kohle}}} \cdot 100 \%$$

$$88 \% \approx \frac{2.762 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{3.150 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}} \cdot 100 \%$$

η : Wirkungsgrad der gesamten Anlage [%]

$\Delta Q_{\text{Gewächshaus}}$: zugeführter (benötigter) Energiebedarf der Gewächshäuser [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

4.4 Leistung der Feuerung

ΔQ_{Kohle} : zugeführter (benötigter) Energiebedarf der Kohle [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

Es werden 88 % der zugeführten Energiemenge den Gewächshäusern zugeführt. Des weiteren beträgt die Schüttdichte von der Anthrazitkohle $790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (siehe Anhang). Hierdurch ergibt sich ein jährliches Lagervermögen sowie Kosten von:

$$V_{Kohle} = \frac{m_{Kohle}}{\rho_{Kohle}}$$

$$443 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{350 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{790 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$K_{Kohle} = m_{Kohle} \cdot k_{Kohle}$$

$$73.500 \frac{\text{€}}{\text{a}} = 350 \frac{\text{t}}{\text{a}} \cdot 210 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$

V_{Kohle} : Volumen der jährlich benötigten Kohle [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

m : Masse der jährliche benötigten Kohle [$\frac{\text{kg}}{\text{a}}$]

ρ_{Kohle} : Schüttdichte der Anthrazitkohle [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]

K_{Kohle} : Kosten der Anthrazitkohle [$\frac{\text{€}}{\text{a}}$]

k_{Kohle} : spezifische Kosten der Anthrazitkohle [$\frac{\text{€}}{\text{kg}}$]

Jährlich müssen demnach etwa 443 m^3 Anthrazitkohle vorgehalten werden. Dies entspricht jährlichen Kosten von 73.500 €.

4.4 Leistung der Feuerung

Um die Leistung bestimmen zu können, die die Feuerung erreichen muss, ist es notwendig den Jahresverlauf der benötigten Leistung zu kennen. Da keine Tages-, Wochen- oder Monatsdaten vorliegen, kann die Leistung nur über die Tabelle von Damrath (siehe Anhang) bestimmt werden. Hierzu wird zunächst die Vollbenutzungsdauer zu gleichen Teilen auf die einzelnen Wochen eines Jahres aufgeteilt. Da die Feuerung das ganze Jahr über aktiv ist, ergibt sich eine Vollbenutzungsdauer von 8.760 h im Jahr. Durch Ausfälle der Anlage, wegen Wartungen und Reinigungen, wird jedoch von einer Vollbenutzungsdauer von 8.000 h im Jahr ausgegangen. Hierdurch ergibt sich eine wöchentliche Vollbenutzungsdauer von:

$$154 \frac{\text{h}}{\text{Woche}} \approx \frac{8.000 \frac{\text{h}}{\text{a}}}{52 \frac{\text{Wochen}}{\text{a}}}$$

Hierüber errechnet sich der in Abbildung 4.2 gezeigte jährliche Leistungsverlauf wie folgt:

4.5 Daten zur Energieträgerumstellung

$$\Delta P = \frac{\Delta q \cdot A}{\eta \cdot 154 \frac{\text{h}}{\text{Woche}}}$$

ΔP : zugeführte Leistung [$\frac{\text{kW}}{\text{Woche}}$]

Δq : spezifischer zugeführter (benötigter) Energiebedarf [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{Woche}}$]

A : Gewächshausfläche [m^2]

η : Wirkungsgrad der gesamten Anlage [%]

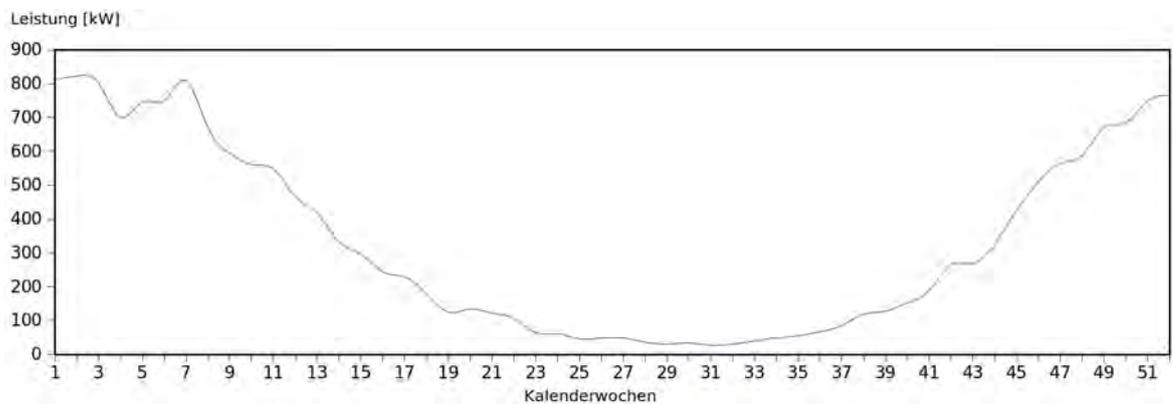


Abb. 4.2: Jährlicher Leistungsverlauf des benötigten Heizkessels

Quelle: Eigene Darstellung nach (Damrath 1982)

Der Leistungsverlauf zeigt, dass der Leistungsbedarf in den Wintermonaten am größten und in den Sommermonaten vergleichsweise gering ist. Die Feuerung muss Leistungen von etwa 30 kW bis zu 820 kW über das Jahr verteilt erbringen.

4.5 Daten zur Energieträgerumstellung

Für die Energieträgerumstellung von Anthrazitkohle zu Energiepflanzen, werden in folgender Tabelle 4.2 die energetisch relevanten Daten sowie die Mengen und Kosten, die für die Nutzung von der Kohle anfallen, aufgezeigt.

Tab. 4.2: Technische Daten des Betriebes

| | | |
|-------------------------------|----------|--------------------------------|
| Gewächshäuser | | |
| Fläche | 7.000 | m ² |
| Jahresdurchschnittstemperatur | 14 | °C |
| Feuerung | | |
| Wirkungsgrad | 88 | % |
| Vollbenutzungsdauer | 8.000 | h |
| Leistungsbereich | 30 - 820 | kW |
| Anthrazitkohle | | |
| Heizwert | 9 | $\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ |
| Masse | 350 | $\frac{\text{t}}{\text{a}}$ |
| Schüttdichte | 790 | $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ |
| Volumen | 443 | $\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$ |
| spezifische Kosten | 210 | $\frac{\text{€}}{\text{t}}$ |
| Kosten | 73.500 | $\frac{\text{€}}{\text{a}}$ |

Quelle: Eigene Darstellung (Kohle siehe Anhang)

Um den Energieträger Anthrazitkohle durch Weiden, Pappeln oder Futtergräser zu ersetzen und gleichzeitig die Raumtemperatur von 14 °C halten zu können, muss die Feuerung demnach das ganze Jahr (8.000 h) betrieben werden. Dabei muss sie im Winter bis zu 820 kW und im Sommer 30 kW leisten. Unter diesen Gesichtspunkten wird im nächsten Kapitel die Feuerung und die Aufbereitung der Energiepflanzen sowie deren energiespezifischer Flächenbedarf beschrieben.

5 Energieträgerumstellung

Die Energieträgerumstellung in dem beispielhaften Betrieb erfolgt von Anthrazitkohle zu Weiden, Pappeln oder Futtergräsern. Die Energiepflanzen sollen vor Ort angebaut, geerntet, aufbereitet, gelagert und bedarfsgerecht verbrannt werden, um die Gewächshausfläche von 7.000 m² auf 14 °C über das Jahr verteilt zu beheizen. Dabei muss ein möglichst fließender Ablauf von Anbau bis Verbrennung stattfinden, damit Engpässe des Brennstoffs, aber auch unnötige Lagerkapazitäten vermieden werden. Um dies zu gewährleisten erfolgt der Ablauf nach einer Bereitstellungskette, die in Abbildung 5.1 dargestellt ist.

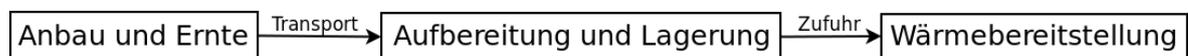


Abb. 5.1: Bereitstellungskette von Anbau bis Nutzung von Energiepflanzen

Quelle: Eigene Darstellung

Anbau und Ernte erfolgt auf den Feldern in der direkten Umgebung des Betriebes. Hier ist der Flächenbedarf die entscheidende Größe zur Umsetzung der Umstellung des Energieträgers. Dieser wird direkt von dem jährlichen Biomassezuwachs der Energiepflanzen bestimmt, der in Kapitel 3 beschrieben wurde. Da die Felder in der direkten Umgebung des Betriebes angesiedelt sind, fällt dem Transport eine untergeordnete Bedeutung zu. Aufbereitung und Lagerung hingegen, sind abhängig von der Zufuhr des Energieträgers in die Feuerung. Zudem werden sie von der Feuerungsanlage bestimmt. Entscheidende Einflussfaktoren sind hierbei der Wassergehalt sowie die Stückgröße des Brennstoffs. Die Wärmebereitstellung erfolgt über die Feuerungsanlage, in der der Brennstoff verbrannt wird und die Wärmeenergie über Wärmetauscher den Gewächshäusern zugeführt wird.

Da die Wärmebereitstellung die Zufuhr und somit Aufbereitung und Lagerung bestimmt, der Flächenbedarf für Anbau und Ernte wiederum von Aufbereitung und Lagerung abhängt, wird zunächst die Feuerungsanlage für die unterschiedlichen Energiepflanzen beschrieben. Anschließend wird auf die Aufbereitung und Lagerung eingegangen, um abschließend den Flächenbedarf für Anbau und Ernte festzulegen.

5.1 Wärmebereitstellung

Die Wärmebereitstellung erfolgt in der Feuerung. Dieses ist eine Anlage, die den Brennstoff in einem Brenner verbrennt, die Wärme im Heizkessel über Wärmetauscher abgibt und letztendlich für die Gewächshausbeheizung bereitstellt. Grundsätzlich werden die in

Abbildung 5.2 dargestellten drei Feuerungsprinzipien unterschieden, bei denen die Brennstoffzufuhr automatisch erfolgt.

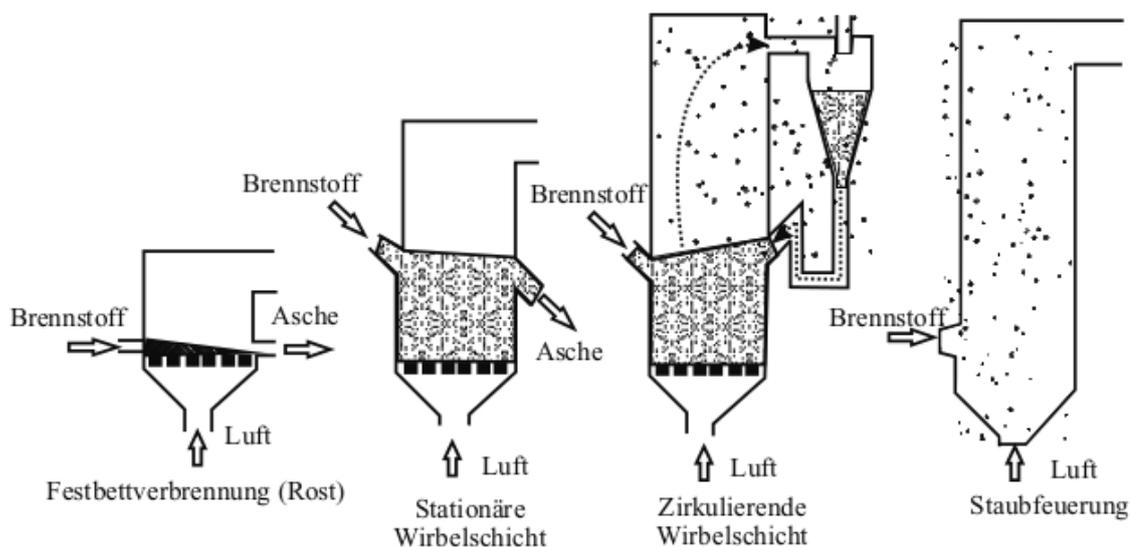


Abb. 5.2: Feuerungsprinzipien für feste Biomasse

Quelle: (Fischer 2009)

Die in Abbildung 5.2 dargestellten Feuerungsprinzipien unterscheiden sich folgendermaßen:

Die Festbettfeuerung zeichnet sich dadurch aus, dass der Brennstoff auf einem Boden oder Rost liegt und von dem Verbrennungsgas (Luft oder reiner Sauerstoff) mit geringer Anströmgeschwindigkeit durchströmt wird. Hierbei wird das Brennstoffbett nicht wesentlich aufgelockert. (Nussbauer et al. 2009)

Die Wirbelschichtfeuerung zeichnet sich durch eine höhere Anströmgeschwindigkeit des Verbrennungsgases aus. Dadurch werden die Brennstoffpartikel aufgelockert und angehoben. Bei der stationären Wirbelschichtfeuerung halten sich diese Partikel in einem Schwebезustand, indem sie verbrannt werden. Bei der zirkulierenden Wirbelschichtfeuerung hingegen, ist die Anströmgeschwindigkeit des Verbrennungsgases so hoch, dass Brennstoffpartikel mit dem sich bildenden Rauchgas ausgetragen werden. Diese werden über einen Zyklon erneut der Verbrennung zugeführt, so dass sich ein zirkulierender Kreislauf der Brennstoffpartikel einstellt. (Nussbauer et al. 2009)

Die Staubfeuerung zeichnet sich dadurch aus, dass alle Brennstoffpartikel über den Verbrennungsgasstrom transportiert werden. Die Verbrennung findet demnach direkt im

5.1 Wärmebereitstellung

Flug statt. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass der Brennstoff vor dem Austrag aus der Feuerung vollständig oxidiert ist. Dies wird durch besonders fein gemahlene und möglichst trockene Brennstoffe erreicht. (Nussbauer et al. 2009)

Diese Feuerungsprinzipien unterscheiden sich nicht nur durch deren Anströmgeschwindigkeit des Verbrennungsgases, sondern auch durch ihren Leistungsbereich und den Wassergehalt des Brennstoffes. Folgende Tabelle 5.1 fasst die typischen Einsatzbereiche der Feuerungsprinzipien zusammen.

Tab. 5.1: Eigenschaften der Festbett-, Wirbelschicht- und Staubfeuerung

| Feuerungsprinzip | Leistungsbereich [MW] | | Wassergehalt [%] | |
|------------------------|-----------------------|-----|------------------|-----|
| | von | bis | von | bis |
| Festbettfeuerug | 0,006 | 60 | 5 | 60 |
| Wirbelschichtfeuerunug | 5 | 100 | 5 | 60 |
| Staubfeuerug | 0,5 | 10 | 15 | 20 |

Quelle: Eigene Darstellung (Nussbauer et al. 2009)

Da für die Beheizung der Gewächshäuser ein Leistungsbereich von 30 bis 820 kW vorgehalten werden muss, kommt demnach nur die Festbettfeuerug in Betracht. Der Leistungsbereich von 5 bis 100 MW der Wirbelschichtfeuerug ist ebenso wie der Leistungsbereich der Staubfeuerug von 500 kW bis 10 MW zu hoch. Des weiteren darf der Wassergehalt des Brennstoffes bei der Staubfeuerug 20 % nicht überschreiten. Dieses ist bei den gewählten Energiepflanzen, deren Wassergehalt zwischen 50 (Weiden und Pappeln) und bis zu 75 % (Futtergräser) nach der Ernte beträgt, nur durch intensive Trocknungsprozesse möglich. (Nussbauer et al. 2009)

Für das Feuerungsprinzip der Festbettfeuerug stehen unterschiedliche Feuerungstechniken zur Verfügung. Diese unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Art des Bodens bzw. des Rostes. Hierdurch wird der Leistungsbereich sowie das verwendete Brenngut bzw. deren Aufbereitung bestimmt. Folgende Tabelle 5.2 fasst die unterschiedlichen Festbettfeuerungen, deren Leistungsbereich sowie das zu verwendende Brenngut zusammen.

Tab. 5.2: Eigenschaften der unterschiedlichen Festbettfeuerungen

| Feuerungstechnik | Leistungsbereich [kW] | | Brenngut |
|--------------------|-----------------------|--------|---|
| | von | bis | |
| Unterschubfeuerung | 10 | 2.500 | Schnitzel Pellets |
| Rostfeuerungen | | | |
| Starrer Rost | 35 | | Schnitzel Pellets |
| Bewegter Rost | 15 | 60.000 | Schnitzel Pellets Späne Rinde Halmgut |
| Walzenrost | 40 | 450 | Schnitzel Pellets |
| Schubbodenfeuerung | 25 | 800 | Schnitzel Pellets Halmgut Körner |

Quelle: Eigene Darstellung (Nussbauer et al. 2009)

Wird der Leistungsbereich sowie das Brenngut aus Tabelle 5.2 betrachtet wird deutlich, dass außer die Walzenrostfeuerung für die Verbrennung von Weiden und Pappeln alle Festbettfeuerungen zur Verfügung stehen. Werden jedoch Futtergräser verbrannt kann nur die Rostfeuerung mit bewegtem Rost sowie die Schubbodenfeuerung genutzt werden, da dies die einzigen Feuerungen sind, die Halmgüter verbrennen können.

Außerdem gibt es unter den Festbettfeuerungen noch die Abwurffeuerung. Bei dieser Methode wird der Brennstoff über eine Förderschnecke über den Brenner gehoben und fällt auf das Brennstoffbett, um dort verbrannt zu werden. Der Leistungsbereich dieser Feuerungstechnik beschränkt sich allerdings auf etwa 60 kW und kann daher den Leistungsbereich für die Beheizung der Gewächshäuser nicht decken. (Nussbauer et al. 2009)

Im weiteren Verlauf werden die unterschiedlichen Festbettfeuerungen vorgestellt, die für eine Wärmebereitstellung in dem beispielhaften Betrieb, unter Berücksichtigung der infrage kommenden Energiepflanzen eingesetzt werden können.

5.1.1 Unterschubfeuerung

Die Unterschubfeuerung eignet sich für Leistungen von 10 bis 2.500 kW. Zur Verbrennung dienen gleichmäßige Brennstoffe mit einem Wassergehalt von bis zu 50 % und einem niedrigen Aschegehalt bis ca. 1 %. Daher sind für diese Feuerungstechnik besonders Holzhack-schnitzel und Holzpellets geeignet, die durch Aufbereitung aus den angebauten Weiden oder Pappeln hergestellt werden können. Für eine Verbrennung von Futtergräsern ist diese Technik nicht geeignet, da Futtergräser einen hohen Aschegehalt aufweisen. (Lewandowski 2009a; Nussbauer et al. 2009)

Abbildung 5.3 zeigt die schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung zur Biomasseverwertung.

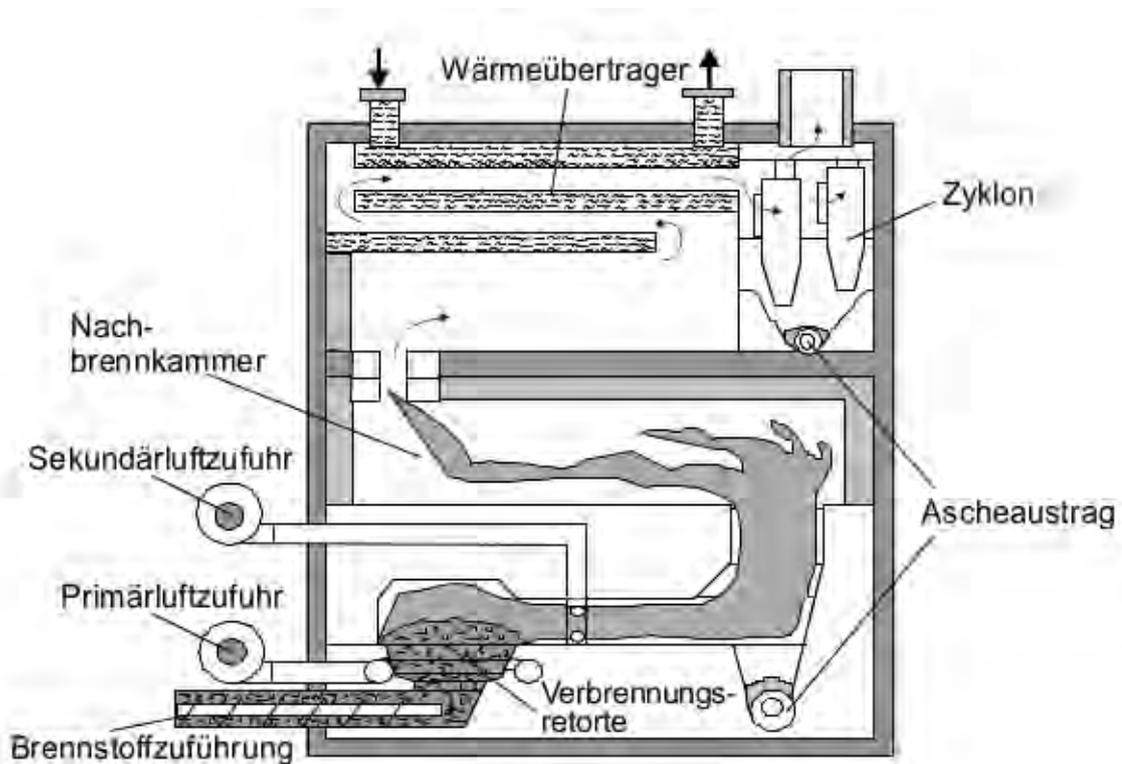


Abb. 5.3: Schematische Darstellung einer Unterschubfeuerung

Quelle: (Nussbauer et al. 2009)

Der Brennstoff wird über eine Förderschnecke von unten in die Brennkammer gefördert. In der Verbrennungsretorte, die sich durch die Brennstoffzufuhr bildet, wird der Primärluftstrom eingeblasen, während der Sekundärluftstrom den Verbrennungsgasen zugeführt wird. Hierdurch sind die in Kapitel 3 beschriebenen Verbrennungsstufen weitestgehend voneinander getrennt. Der zugeführte Brennstoff wird in der Verbrennungsretorte getrocknet, aufgeheizt

und schließlich pyrolytisch Zersetzt. Durch die Zufuhr der Primärluft erfolgt die Vergasung der sich bildenden Produkte und der Ausbrand der Kohle. Anschließend werden die Verbrennungsgase über den Sekundärluftstrom mit Sauerstoff gemischt und oxidieren in der Nachbrennkammer bestenfalls vollständig. Die heißen Gase umströmen die Wärmeübertragerflächen, wodurch die Wärmeenergie nach außen abgegeben wird. Im weiteren Verlauf gelangen die Gase über einen Zyklon, der die Gase entstaubt, in die Atmosphäre. (Nussbauer et al. 2009)

5.1.2 Rostfeuerungen

Die Rostfeuerung kann weiter unterteilt werden. Die beiden Feuerungstechniken, die sich für die Beheizung der Gewächshäuser des Beispielbetriebes eignen unterscheiden sich im wesentlichen durch ihren Rost. Bei der einen Technik ist dieser unbeweglich (starrer Rost) und bei der anderen beweglich (bewegter Rost). Da das Funktionsprinzip bei beiden Feuerungstechniken gleich ist, wird die Feuerung beispielhaft für beide Techniken anhand einer Vorschubrostfeuerung beschrieben.

Die Vorschubrostfeuerung eignet sich für Leistungen von 150 kW bis zu 60 MW. Zur Verbrennung dienen alle Holzbrennstoffe sowie Halmgüter. Durch das bewegte Rost und die im Vergleich zur Unterschubfeuerung große Fläche des Bettmaterials kann der Brennstoff einen hohen Wassergehalt von bis zu 60 % sowie einen hohen Aschegehalt von bis zu 50 % betragen, wodurch keine Trocknung der aufbereiteten Ernte von Weiden oder Pappeln anfällt. (Lewandowski 2009a; Nussbauer et al. 2009)

Abbildung 5.4 zeigt die schematische Darstellung einer Vorschubrostfeuerung nach dem Gegenstromprinzip.

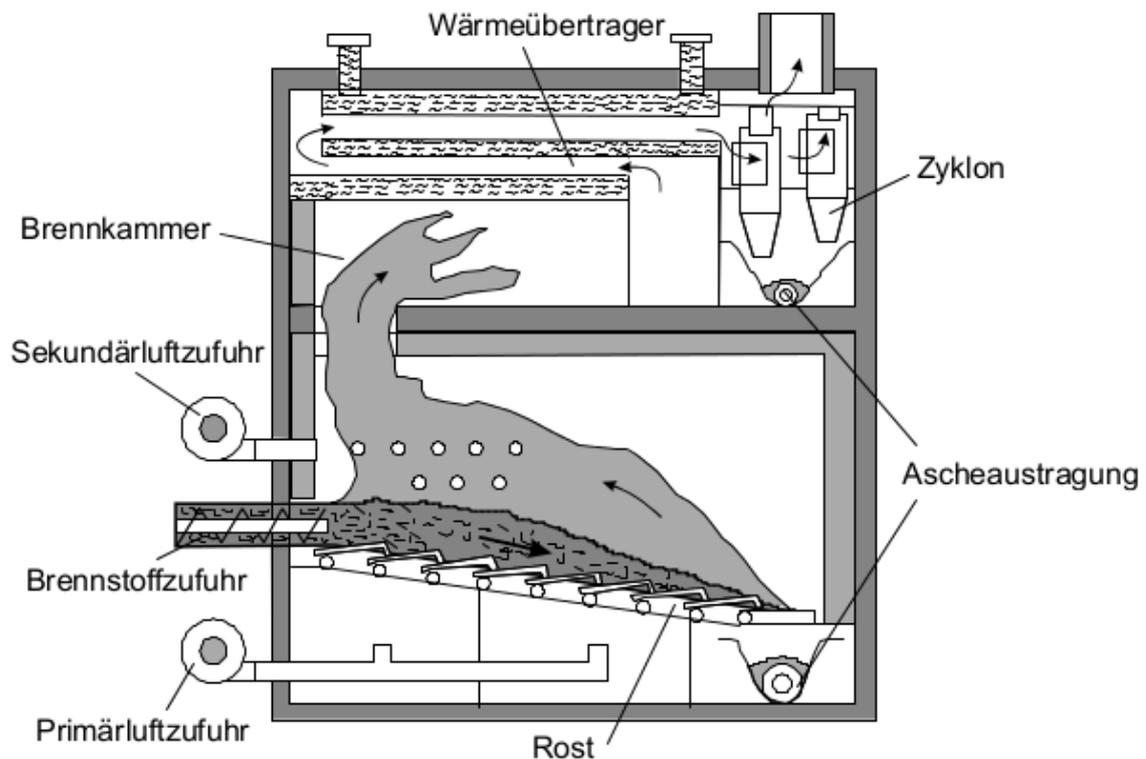


Abb. 5.4: Schematische Darstellung einer Vorschubrostfeuerung

Quelle: (Nussbauer et al. 2009)

Der Brennstoff wird über eine Förderschnecke oder einen Kolbenschieber auf das Rost gegeben. Durch vorwärts und rückwärts Bewegungen des Rostes wird das Brenngut auf dem Rost verteilt. Die leichteren Partikel wandern hierbei schneller über das Rost, als die Schwereren. Hierdurch stellt sich eine räumliche Trennung der unterschiedlichen Verbrennungsstufen aus Kapitel 3 ein. Der feuchte und schwere Brennstoff wird bei Eintritt in die Feuerung getrocknet und aufgeheizt. Durch den Masseverlust, über die Verdampfung des Wassers, wandert der trockene Brennstoff über das Rost in die mittlere Zone und wird dort pyrolytisch zersetzt. Der Primärluftstrom, der unter dem Rost eingeblasen wird, sorgt dafür, dass zum einen das Rost gekühlt wird und zum anderen, die Produkte aus der pyrolytischen Zersetzung vergast werden. Am Ende des Rostes findet noch der Kohleausbrand statt. Anschließend fällt die Asche in ein Behältnis. Die gasförmigen Produkte aus Pyrolyse und Vergasung werden über den Sekundärluftstrom mit Sauerstoff gemischt, gelangen in die Brennkammer und oxidieren dort vollständig. Die entstehenden heißen Gase umströmen anschließend die Wärmeübertragerflächen, wodurch die Wärmeenergie nach außen abgegeben wird. Im weiteren Verlauf gelangen die Gase über einen Zyklon, der die Gase entstaubt, in die Atmosphäre. (Nussbauer et al. 2009)

5.1.3 Schubbodenfeuerung

Die Schubbodenfeuerung eignet sich für Leistungen von 25 bis zu 800 kW. Zur Verbrennung dienen Schnitzel und Pellets aus dem Weiden- oder Pappelanbau sowie Halmgut und Körner aus dem Futtergrasanbau. Dadurch, dass diese Feuerung keinen Rost sondern eine Brennmulde besitzt, kommen zur Verbrennung vor allem Brennstoffe mit hohem Aschegehalt zum Einsatz, was bei Futtergräsern der Fall ist. (Lewandowski 2009a; Nussbauer et al. 2009)

Abbildung 5.5 zeigt die schematische Darstellung einer Schubbodenfeuerung mit Wassergekühlter Brennmulde.

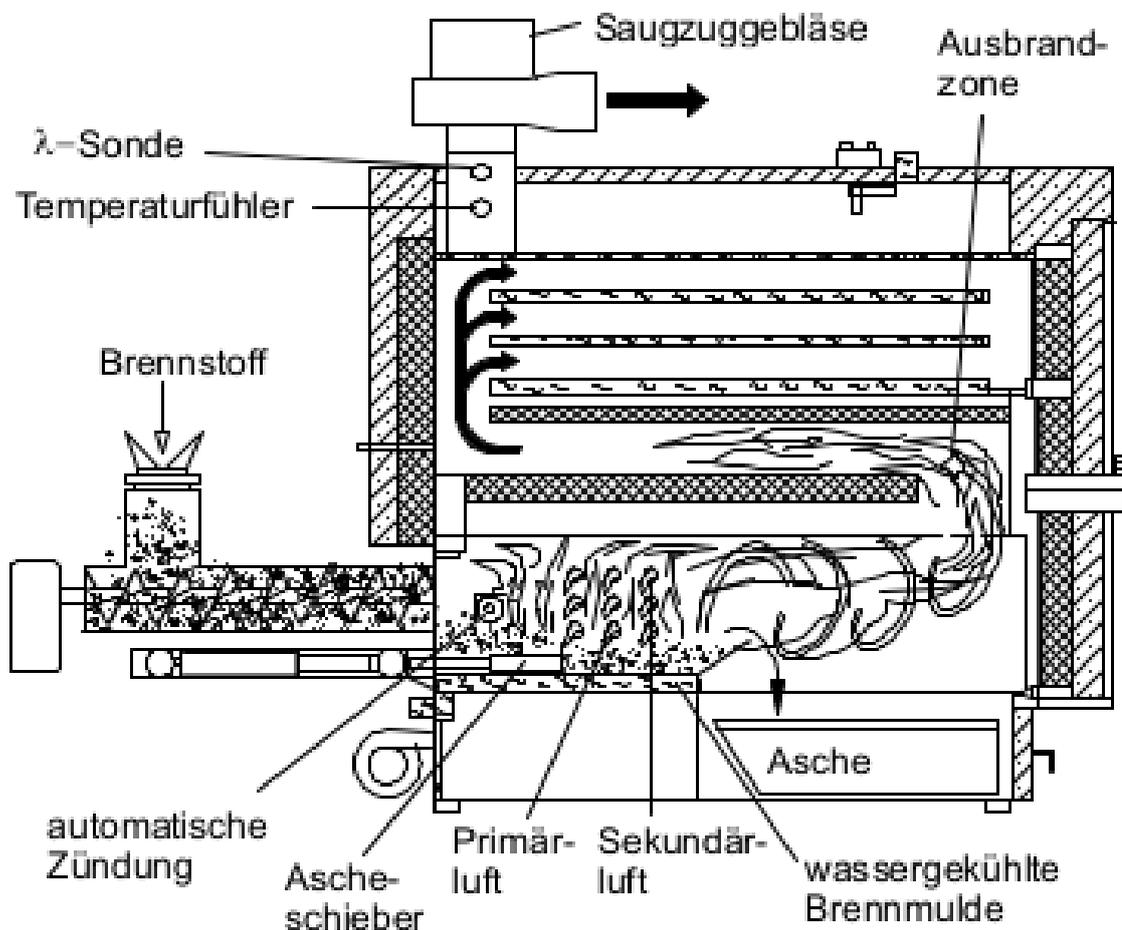


Abb. 5.5: Schematische Darstellung einer Schubbodenfeuerung

Quelle: (Nussbauer et al. 2009)

Der Brennstoff wird zerkleinert und über eine Förderschnecke in die Brennmulde transpor-

tiert. In dieser wird das Brenngut getrocknet, aufgeheizt und pyrolytisch zersetzt. Durch die Primärluftzufuhr werden die Produkte der pyrolytischen Zersetzung vergast. Direkt im Anschluss wird der Sekundärluftstrom zugeführt und über das Saugzuggebläse durchmischt mit den Gasen aus der Pyrolyse und Vergasung in die Ausbrandzone gesogen. Hier oxidieren die Gase vollständig und übertragen die Wärmeenergie über die Wärmetauscherübertragerflächen nach außen. Die abgekühlten Gase gelangen anschließend über das Saugzuggebläse in die Atmosphäre. Desweiteren befördert ein Ascheschieber in der Brennmulde die Asche in ein Behältnis, indem dieser über den Boden der Brennmulde geschoben wird. (Nussbauer et al. 2009)

5.2 Feuerungsanlagen für den Betrieb

Die Gewächshausbeheizung erfolgt das ganze Jahr, wobei der Leistungsbereich von 820 kW in den Wintermonaten und 30 kW in den Sommermonaten stark schwankt. Daher werden im Folgenden verschiedene Feuerungsanlagen beschrieben, die in Grundlast-Feuerung und Spitzenlast-Feuerung aufgeteilt sind. Es werden konkrete Feuerungsanlagen beschrieben, mit denen die Gewächshäuser über Weiden, Pappeln oder Futtergräser beheizt werden können. Hierbei werden die Feuerungsanlagen ausgelegt und deren benötigte Brennstoffzufuhr ermittelt.

5.2.1 Grundlast Feuerungsanlage

Diese Feuerung soll möglichst das ganze Jahr die Gewächshäuser mit Wärmeenergie versorgen. Hierfür muss die minimale Leistung 30 kW betragen, um dauerhaft betrieben zu werden. Folgende Tabelle 5.3 zeigt beispielhaft Feuerungsanlagen von unterschiedlichen Herstellern, die dafür infrage kommen.

5.2 Feuerungsanlagen für den Betrieb

Tab. 5.3: Feuerungsanlagen zur Grundlast-Abdeckung

| | | AWK 90 | ETA HACK 90 | BIOMAT FBS 100 |
|--------------------|------|------------------------|------------------------|--|
| Feuerungsart | | Unterschubfeuerung | Rostfeuerung | Rostfeuerung |
| Nennleistung | [kW] | 98 | 88 | 99 |
| min. Wärmeleistung | [kW] | 30 | 26 | 30 |
| Wirkungsgrad | [%] | 89,4 | 93,3 | 90 |
| Brennstoff | | Hackgut Holzpellets | Hackgut Holzpellets | Hackgut Holzpellets Strohpellets |
| Partikelgröße | [mm] | 3,15 - 63,00 | 3,15 - 45,00 | 3,15 - 45,00 |
| Wassergehalt | [%] | 30 - 40 | 30 - 40 | 20 - 30 |

Quelle: Eigene Darstellung (nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b)

Die Feuerung AWK 90 ist von der Firma Biokompakt Heiztechnik GmbH, die ETA HACK 90 von ETA Heiztechnik GmbH und die BIOMAT FBS 100 von Ferro Wärmetechnik GmbH. Jede der drei vorgestellten Feuerungsanlagen kann die minimale Leistung von 30 kW abdecken, erreicht jedoch nur eine Nennleistung von 88 bis 99 kW. Dies entspricht einer abgegebenen Leistung von 82 bis 89 kW. Hierdurch kann nicht der gesamte Leistungsbereich gedeckt werden, dafür können die Feuerungen dauerhaft betrieben werden. Abbildung 5.6 zeigt den Leistungsbereich der Grundlast-Feuerungen.

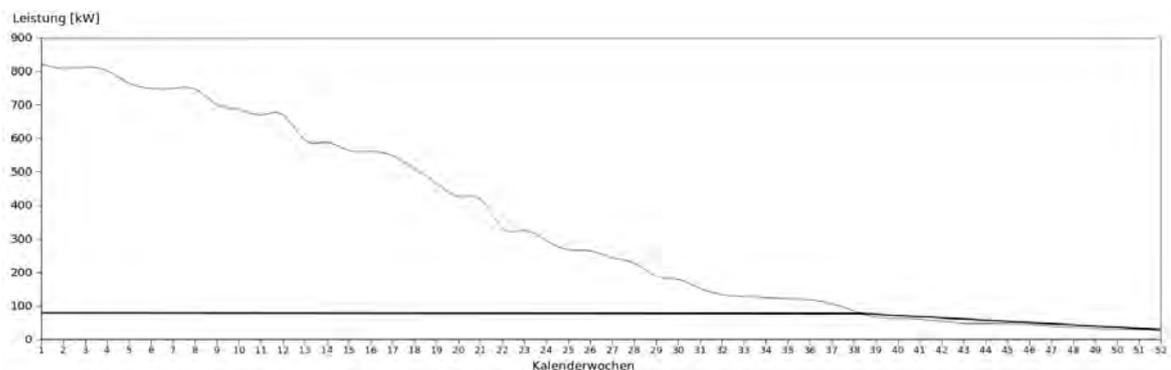


Abb. 5.6: Leistungsbereich der Grundlast-Feuerung

Quelle: Eigene Darstellung (nach Damrath 1982)

Die Feuerung kann 38 Wochen mit Nennleistung betrieben werden. Danach nimmt der Leistungsbedarf nahezu linear ab. Dies entspricht einer jährlich zugeführten Energiemenge von:

5.2 Feuerungsanlagen für den Betrieb

$$\Delta Q_{Grund} = 6.384 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot P_{Nenn} + 2.352 \frac{\text{h}}{\text{a}} \left(\frac{P_{min}}{\eta} + \frac{P_{Nenn} - \frac{P_{min}}{\eta}}{2} \right)$$

AWK 90:

$$784 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \approx 6.384 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 98 \text{ kW} + 2.352 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{30 \text{ kW}}{89,4 \%} + \frac{98 \text{ kW} - \frac{30 \text{ kW}}{89,4 \%}}{2} \right)$$

ETA HACK 90:

$$703 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \approx 6.384 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 88 \text{ kW} + 2.352 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{30 \text{ kW}}{93,3 \%} + \frac{88 \text{ kW} - \frac{30 \text{ kW}}{93,3 \%}}{2} \right)$$

BIOMAT FBS 100:

$$787 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \approx 6.384 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 99 \text{ kW} + 2.352 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{30 \text{ kW}}{90 \%} + \frac{99 \text{ kW} - \frac{30 \text{ kW}}{90 \%}}{2} \right)$$

ΔQ_{Grund} : zugeführter (benötigter) Energiebedarf für die Grundlast-Feuerung [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

P_{Nenn} : Nennleistung [kW]

P_{min} : minimale Wärmeleistung [kW]

η : Wirkungsgrad [%]

Demnach liegt der zugeführte Energiebedarf je nach Feuerung zwischen 703 und 787 $\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ für die Grundlast Wärmebereitstellung.

5.2.2 Spitzenlast Feuerungsanlage

Diese Feuerung soll den hohen Energiebedarf in den Wintermonaten bereitstellen. Außerdem soll die Anlage nicht nur die Spitzenlasten sondern auch einen großen Leistungsbereich abdecken. Zusammen mit der Grundlast-Feuerung soll über die beiden Feuerungsanlagen der gesamte Wärmeenergiemenge bereitgestellt werden. Folgende Tabelle 5.4 zeigt beispielhaft Feuerungsanlagen von verschiedenen Herstellern, die dafür infrage kommen.

5.2 Feuerungsanlagen für den Betrieb

Tab. 5.4: Feuerungsanlagen zur Spitzenlast-Abdeckung

| | | BIOMAT FBS 800 | HELBIG VR-S 800 | HELBIG USF-W 750 |
|--------------------|------|--|------------------------|--------------------|
| Feuerungsart | | Rostfeuerung | Rostfeuerung | Unterschubfeuerung |
| Nennleistung | [kW] | 800 | 800 | 850 |
| min. Wärmeleistung | [kW] | 240 | 320 | 250 |
| Wirkungsgrad | [%] | 90 | 90,5 | 89,8 |
| Brennstoff | | Hackgut Holzpellets Strohpellets | Hackgut Holzpellets | Hackgut |
| Partikelgröße | [mm] | 3,15 - 45 | 3,15 - 45,00 | 8,00 - 45,00 |
| Wassergehalt | [%] | 20 - 30 | 30 - 40 | 20 - 30 |

Quelle: Eigene Darstellung (nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b)

Die Feuerung BIOMAT FBS 800 ist von der Firma Ferro Wärmetechnik GmbH und die HELBIG VR-S 800 sowie die HELBIG USF-W 750 von Hans-Jürgen Helbig GmbH. Jede der drei vorgestellten Feuerungsanlagen erreicht, in Kombination mit einer der Grundlast-Feuerungen, die benötigte Leistung von 820 kW. Die minimale Wärmeleistung beträgt zwischen 240 und 320 kW. Wie Abbildung 5.7 veranschaulicht, ergibt sich in Verbindung mit der Nennleistung folgender Leistungsbereich.

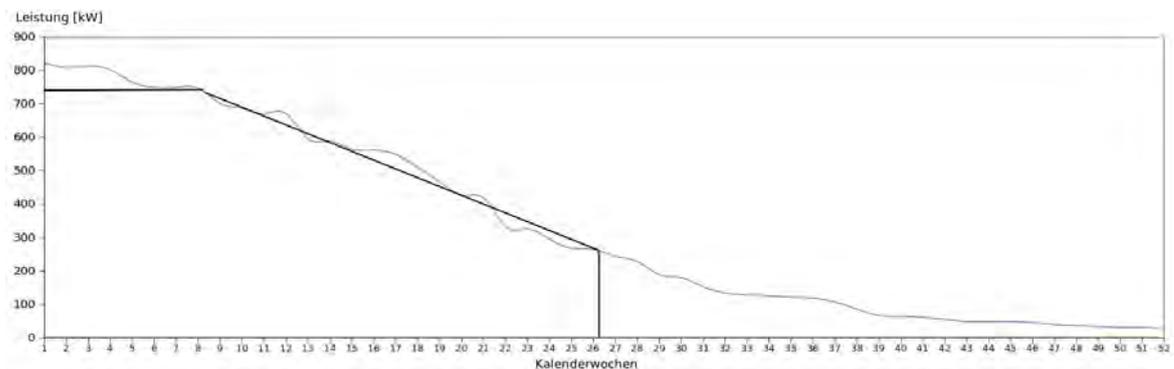


Abb. 5.7: Leistungsbereich der Spitzenlast-Feuerung

Quelle: Eigene Darstellung (nach Damrath 1982)

Die Feuerung kann etwa 26 Wochen betrieben werden, wobei lediglich neun Wochen im Nennleistungsbereich liegen. Dies entspricht einer jährlich zugeführten Energiemenge von:

5.2 Feuerungsanlagen für den Betrieb

$$\Delta Q_{Spitz} = 6.384 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot P_{Nenn} + 2.352 \frac{\text{h}}{\text{a}} \left(\frac{P_{min}}{\eta} + \frac{P_{Nenn} - P_{min}}{2} \right)$$

BIOMAT FBS 800:

$$2.733 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \approx 1.512 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 800 \text{ kW} + 2.856 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{240 \text{ kW}}{90 \%} + \frac{800 \text{ kW} - \frac{240 \text{ kW}}{90 \%}}{2} \right)$$

HELBIG VR-S 800:

$$2.857 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \approx 1.512 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 800 \text{ kW} + 2.856 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{320 \text{ kW}}{90,5 \%} + \frac{800 \text{ kW} - \frac{320 \text{ kW}}{90,5 \%}}{2} \right)$$

HELBIG USF-W 750:

$$2.808 \frac{\text{MWh}}{\text{a}} \approx 1.512 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot 820 \text{ kW} + 2.856 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{250 \text{ kW}}{89,8 \%} + \frac{820 \text{ kW} - \frac{250 \text{ kW}}{89,8 \%}}{2} \right)$$

ΔQ_{Spitz} : zugeführter (benötigter) Energiebedarf für die Spitzenlast-Feuerung [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

P_{Nenn} : Nennleistung [kW]

P_{min} : minimale Wärmeleistung [kW]

η : Wirkungsgrad [%]

Demnach liegt der zugeführte Energiebedarf je nach Feuerung zwischen 2.733 und 2.857 $\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ für die Spitzenlast Wärmebereitstellung.

5.2.3 Kombination der Feuerungsanlagen

Durch die Kombination der Feuerungsanlagen, soll der gesamte Leistungsbereich von 30 bis 820 kW gedeckt werden. Dabei sollen die Feuerungen möglichst lange unter Nennlast laufen. Abbildung 5.8 zeigt den Leistungsbereich, der durch die Kombination der Anlagen abgedeckt wird.

5.2 Feuerungsanlagen für den Betrieb

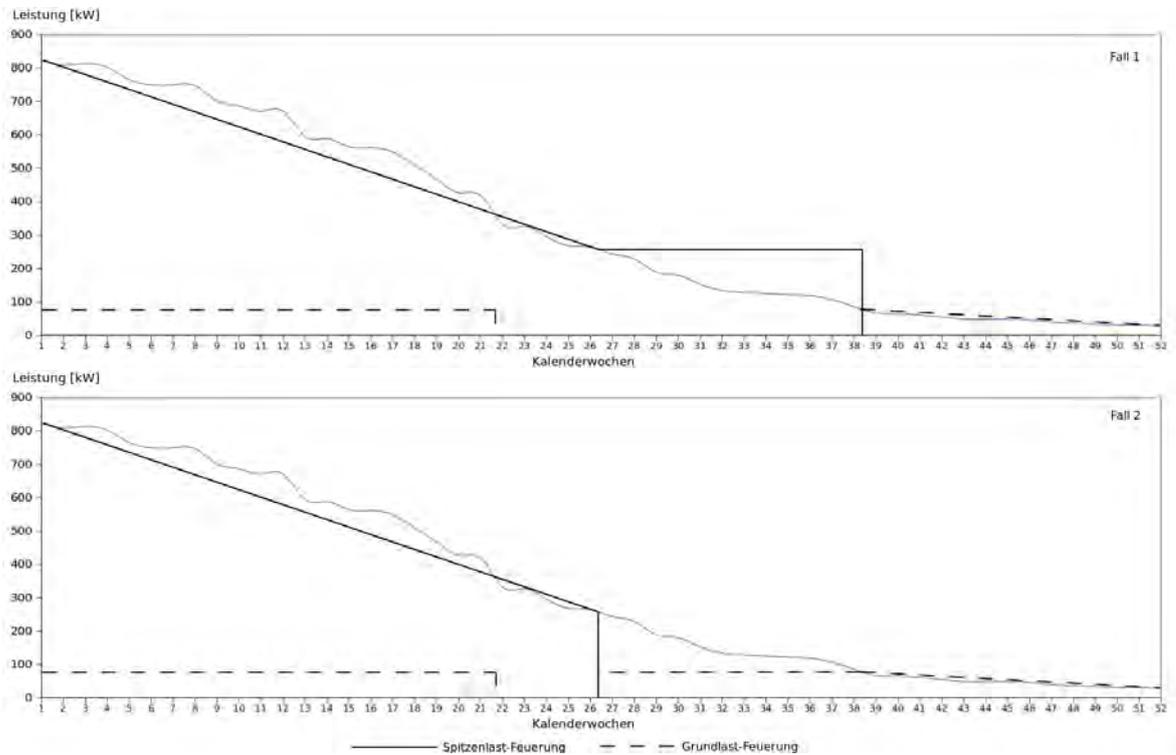


Abb. 5.8: Leistungsbereich der Feuerungsanlagen

Quelle: Eigene Darstellung (nach Damrath 1982)

Die Grundlast-Feuerung wird in beiden Fällen etwa 22 Wochen betrieben. Zudem stellt diese Anlage im ersten Fall noch etwa 14 Wochen die benötigte Grundlast zur Verfügung. Im zweiten Fall läuft die Grundlast-Feuerung noch etwa zwölf Wochen im Nennlastbetrieb. Die Spitzenlast-Feuerung unterstützt die Grundlast-Feuerung 22 Wochen bei der Leistungsbereitstellung und wird in jedem Fall noch etwa fünf Wochen alleine betrieben, um den Leistungsbereich abdecken zu können. Im weiteren Verlauf der Leistung wird die Spitzenlast-Feuerung im ersten Fall bei minimaler Wärmebereitstellung betrieben. Dies hat eine Wärmeübersorgung innerhalb von etwa zwölf Wochen zur Folge. Im zweiten Fall wird die Anlage abgeschaltet. Hierdurch kann in zwölf Wochen der benötigte Leistungsbedarf nicht gedeckt werden. Es liegt demnach in zwölf Wochen im Jahr eine Unterversorgung vor.

Der benötigte Energiebedarf, der über die unterschiedlichen Feuerungsanlagen zugeführt werden muss ist in Tabelle 5.5 aufgeführt und wird wie folgt berechnet:

5.2 Feuerungsanlagen für den Betrieb

Fall 1:

$$\Delta Q_{Grund} = 3.696 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot P_{Nenn} + 2.352 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{P_{min}}{\eta} + \frac{P_{Nenn} - \frac{P_{min}}{\eta}}{2} \right)$$

$$\Delta Q_{Spitz} = 2.016 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \frac{P_{min}}{\eta} + 3.696 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{P_{min}}{\eta} + \frac{P_{Nenn} - \frac{P_{min}}{\eta}}{2} \right)$$

Fall 2:

$$\Delta Q_{Grund} = 5.712 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot P_{Nenn} + 2.352 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{P_{min}}{\eta} + \frac{P_{Nenn} - \frac{P_{min}}{\eta}}{2} \right)$$

$$\Delta Q_{Spitz} = 3.696 \frac{\text{h}}{\text{a}} \cdot \left(\frac{P_{min}}{\eta} + \frac{P_{Nenn} - \frac{P_{min}}{\eta}}{2} \right)$$

Fall 1 + Fall 2:

$$\Delta Q = \Delta Q_{Grund} + \Delta Q_{Spitz}$$

ΔQ : zugeführter (benötigter) Energiebedarf für die beiden Feuerungen [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

ΔQ_{Grund} : zugeführter (benötigter) Energiebedarf für die Grundlast-Feuerung [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

ΔQ_{Spitz} : zugeführter (benötigter) Energiebedarf für die Spitzenlast-Feuerung [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

P_{Nenn} : Nennleistung [kW]

P_{min} : minimale Wärmeleistung [kW]

η : Wirkungsgrad [%]

Tab. 5.5: Feuerungsanlagen zur Spitzenlast-Abdeckung

| | | AWK 90 | | ETA HACK 90 | | BIOMAT FBS 100 | |
|------------------|--------|-----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| | | [$\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$] | | [$\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$] | | [$\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$] | |
| | | Fall 1 | Fall 2 | Fall 1 | Fall 2 | Fall 1 | Fall 2 |
| BIOMAT FBS 800 | Fall 1 | 3.026 | — | 2.971 | — | 3.031 | — |
| | Fall 2 | — | 2.686 | — | 2.610 | — | 2.692 |
| HELBIG VR-S 800 | Fall 1 | 3.362 | — | 3.307 | — | 3.367 | — |
| | Fall 2 | — | 2.847 | — | 2.771 | — | 2.853 |
| HELBIG USF-W 750 | Fall 1 | 3.164 | — | 3.109 | — | 3.169 | — |
| | Fall 2 | — | 2.800 | — | 2.724 | — | 2.806 |

Quelle: Eigene Darstellung (nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b)

5.3 Aufbereitung und Lagerung

In beiden Fällen benötigt die Kombination aus der BIOMAT FBS 800 und der ETA HACK 90 die geringste Energiemenge, um den Heizenergiebedarf zu decken. Die Kombination aus der HELBIG VR-S 800 und der BIOMAT FBS 100 den geringsten.

Da im weiteren Verlauf beide Fälle betrachtet werden, fällt die Wahl der Feuerungsanlagen auf die Kombination von der BIOMAT FBS 800 und der BIOMAT FBS 100. Dies hat den Vorteil, dass beide Feuerungsanlagen vom gleichen Hersteller sind und somit leichter miteinander kombinierbar sind. Des Weiteren kann mit dieser Kombination in beiden Feuerungen Hackgut, Holz- sowie Strohpellets verbrannt werden. Zusätzlich liegt die benötigte Energiemenge zur Beheizung der Gewächshausfläche zwischen den höchsten und niedrigsten Werten.

Die Kosten sowie die benötigte Fläche die vorgehalten werden muss, um die Feuerungsanlagen in den Betrieb zu integrieren, sind in Tabelle 5.6 aufgeführt.

Tab. 5.6: Kosten und Flächenbeanspruchung der Feuerungsanlagen

| | | BIOMAT FBS 800 | BIOMAT FBS 100 |
|------------|-------------------|----------------|----------------|
| Länge | [m] | 7,7 | 3,2 |
| Tiefe | [m] | 1,5 | 0,7 |
| Fläche | [m ²] | 11,6 | 2,3 |
| Siloinhalt | [L] | 560 | 450 |

Quelle: Eigene Darstellung (nach FERRO Wärmetechnik GmbH 2012)

Zusammengenommen ergibt sich ein Flächenbedarf von 13,85 m² für die Feuerungsanlage. Hierbei ist der Flächenbedarf, der für die Lagerung anfällt noch nicht enthalten. Dieser wird im Folgenden Abschnitt thematisiert.

5.3 Aufbereitung und Lagerung

Mit den ausgewählten Feuerungsanlagen können Hackgut, Holz- und Strohpellets verbrannt werden. Daher müssen die Energiepflanzen erst aufbereitet werden, bevor sie der Verbrennung zugeführt werden können. Die benötigte Lagerkapazität hängt außerdem von der Form des Brennstoffs ab. Folgende Tabelle 5.7 zeigt die Eigenschaften der Brennstoffe auf, die in den Feuerungen verbrannt werden können.

Tab. 5.7: Brennstoffeigenschaften für die BIOMAT FBS 100 und die BIOMAT FBS

| | Hackgut | Holz- und Strohpellets |
|--------------------|--------------|------------------------|
| Partikelgröße [mm] | 3,15 - 45,00 | 3,15 - 45,00 |
| Wassergehalt [%] | ≤ 60 | 20 - 30 |

Quelle: Eigene Darstellung (nach FERRO Wärmetechnik GmbH 2012; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b)

Weiden und Pappeln können nach Zerkleinerung auf eine Partikelgröße von 3,15 bis 45 mm direkt verbrannt werden, da diese nach der Ernte bereits einen Wassergehalt von etwa 50 % aufweisen (Lewandowski 2009a). Dabei ist die Lagermöglichkeit jedoch eingeschränkt, weil Hackgut mit einer Feuchte von über 30 % bei längerer Lagerung biologischen Zersetzungsprozessen ausgesetzt ist (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b).

Im folgenden wird auf die Lagerkapazität eingegangen, die benötigt wird um die Brennstoffzufuhr gewährleisten zu können.

5.3.1 Hackgut Bereitstellung

Um zu ermitteln welche Mengen Hackgut jährlich benötigt werden, muss der Wassergehalt in den Heizwert der Trockenmasse eingerechnet werden. Hierdurch ergibt sich ein Heizwert von Hackschnitzeln aus Weiden und Pappeln mit einem Wassergehalt von 30 % von:

$$H_u(w) = H_u(wf) \cdot (1 - w) - 2,44 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot w$$

$$3,4 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 18,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot (1 - 30 \%) - 2,44 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 30 \%$$

$H_u(w)$: Heizwert des Holzes mit einem Wassergehalt von w [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$]

$H_u(wf)$: Heizwert der Holztrockensubstanz [$\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$]

w : Wassergehalt [%]

2,44 : Verdampfungswärme des Wassers bezogen auf 25 °C [$\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$]

Der Heizwert des Hackguts liegt bei $3,4 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ (nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012a). Hierüber lässt sich zusammen mit der benötigten Energiemenge die Masse und das Volumen wie folgt berechnen:

5.3 Aufbereitung und Lagerung

Fall 1:

$$\Delta m = \frac{\Delta Q}{H_u(w)} \quad 891,5 \frac{\text{t}}{\text{a}} \approx \frac{3.031 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{3,4 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}$$

$$\Delta Srm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 3.155 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{891,5 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{282,56 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Rm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 2.585 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{891,5 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{344,83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

Fall 2:

$$\Delta m = \frac{\Delta Q}{H_u(w)} \quad 791,8 \frac{\text{t}}{\text{a}} \approx \frac{2.692 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{3,4 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}$$

$$\Delta Srm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 2.802 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{791,8 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{282,56 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Rm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 2.296 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{791,8 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{344,83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

Δm : Masse des Holzes [$\frac{\text{kg}}{\text{a}}$]

ΔSrm : Schüttraummeter (z.B. Hackgut, Schüttgut) [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

ΔRm : Raummeter (geschichtetes Holz unter Einschluss der Luftzwischenräume) [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

ΔQ : zugeführter (benötigter) Energiebedarf für die beiden Feuerungen [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

$H_u(w)$: Heizwert des Holzes mit einem Wassergehalt von w [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$]

ρ : Dichte des Schüttraummeters [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]

Während die jährliche Menge an Hackgut von 791,8 bis 891,5 t eine Lagerkapazität von 2.802 bis 3.155 m³ benötigt, reichen für die Lagerung von geschichtetem Holz der gleichen Energiemenge 2.296 bis 2.585 m³ aus (nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012a). Des weiteren hat geschichtetes Holz keine Lageransprüche und wird nach der Ernte beispielsweise direkt am Feld abgelegt. Dadurch senkt sich der Wasseranteil des im Winter abgelegten Holzes durch Lufttrocknung bis zum Sommer auf etwa 30 %. Durch die Lufttrocknung wird somit auch der geringere Wassergehalt erreicht, der zur Lagerung von Hackgut benötigt wird. (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2010)

Aus diesen Gründen bietet es sich an, eine größere Lagermenge von geschichtetem Holz vorzuhalten und diese bedarfsgerecht zu Hackgut zu verarbeiten. Die Silos der beiden Feue-

rungen fassen jedoch nur 450 L und 560 L. Unter der Annahme, dass die benötigte Energiemenge gleichmäßig über das Jahr verteilt zugeführt würde, müsste demnach das Silo ca. alle drei Stunden neu aufgefüllt werden. Daher muss zusätzlich ein Zwischenlager für Hackgut eingerichtet werden. Dieses sollte so ausgelegt sein, dass es etwa zwei Wochen die Feuerungen mit Hackgut versorgen kann (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b). Über das Jahr verteilt ergibt sich hieraus eine Lagerkapazität von etwa 120 m³ für zwei Wochen.

5.3.2 Holzpellets Bereitstellung

Bei der Holzpelletherstellung wird zunächst genauso verfahren, wie bei der Hackgutherstellung. Das geschichtete Holz wird also zu Hackgut verarbeitet, anschließend werden diese zu Pellets gepresst. Dabei liegt der Heizwert von diesem Brennstoff bei 5,0 $\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ (nach C.A.R.M.E.N. e.V. 2013). Hierüber lässt sich, zusammen mit der benötigten Energiemenge, die Masse und das Volumen wie folgt berechnen:

Fall 1:

$$\Delta m = \frac{\Delta Q}{H_u(w)} \quad 606,2 \frac{\text{t}}{\text{a}} \approx \frac{3.031 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{5,0 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 913 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{606,2 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{664 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Srm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 2.145 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{606,2 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{282,56 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Rm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 1.758 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{606,2 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{344,83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

Fall 2:

$$\Delta m = \frac{\Delta Q}{H_u(w)} \quad 538,4 \frac{\text{t}}{\text{a}} \approx \frac{2.692 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{5,0 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 811 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{538,4 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{664 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Srm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 1.905 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{538,4 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{282,56 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Rm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 1.561 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{538,4 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{344,83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

5.3 Aufbereitung und Lagerung

Δm : Masse des Holzes [$\frac{\text{kg}}{\text{a}}$]

ΔV : Volumen der Pellets [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

ΔSrm : Schüttraummeter (z.B. Hackgut, Schüttgut) [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

ΔRm : Raummeter (geschichtetes Holz unter Einschluss der Luftzwischenräume) [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

ΔQ : zugeführter (benötigter) Energiebedarf für die beiden Feuerungen [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

$H_u(w)$: Heizwert des Holzes mit einem Wassergehalt von w [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$]

ρ : Dichte des Schüttraummeters [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]

Während die jährliche Menge Holzpellets von 538,4 bis 606,2 t eine Lagerkapazität von 811 bis 913 m³ benötigt, muss für die gleiche Energiemenge, sofern diese über Pellets zur Verfügung gestellt wird, eine Lagerkapazität von 1.905 bis 2.145 m³ Hackgut eingeplant werden. Die jährliche Lagerkapazität von geschichtetem Holz beträgt 1.561 bis 1.758 m³. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b)

Aus diesen Gründen bietet es sich an die größte Lagermenge an Holzpellets und die kleinste für das Hackgut bereit zu halten, das als Zwischenprodukt bei der Pelletierung anfällt. Hierfür kann beispielsweise das geschichtete Holz, nachdem es zu Hackgut verarbeitet wurde, direkt zu Pellets gepresst werden, so dass die Lagerkapazität von Hackschnitzeln nicht anfällt.

5.3.3 Strohpellets Bereitstellung

Die Herstellung von Strohpellets ist der Herstellung von Holzpellets sehr ähnlich. Die Gräser werden nach der Ernte einer Lufttrocknung unterzogen, anschließend zerkleinert und zu Pellets gepresst. Dadurch ergibt sich ein Heizwert von 4,9 $\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ (nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b). Hierüber lässt sich zusammen mit der benötigten Energiemenge die Masse und das Volumen wie folgt berechnen:

Fall1:

$$\Delta m = \frac{\Delta Q}{H_u(w)} \quad 618,6 \frac{\text{t}}{\text{a}} \approx \frac{3.031 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{4,9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 1.026 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{618,6 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{603 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Srm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 2.189 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{618,6 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{282,56 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

5.3 Aufbereitung und Lagerung

$$\Delta Rm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 1.794 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{618,6 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{344,83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

Fall 2:

$$\Delta m = \frac{\Delta Q}{H_u(w)} \quad 549,4 \frac{\text{t}}{\text{a}} \approx \frac{2.692 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{4,9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 911 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{549,4 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{603 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Srm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 1.944 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{549,4 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{282,56 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\Delta Rm = \frac{\Delta m}{\rho} \quad 1.593 \frac{\text{m}^3}{\text{a}} \approx \frac{549,4 \frac{\text{t}}{\text{a}}}{344,83 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

Δm : Masse des Strohs [$\frac{\text{kg}}{\text{a}}$]

ΔV : Volumen der Pellets [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

ΔSrm : Schüttraummeter (z.B. Hackgut, Schüttgut) [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

ΔRm : Raummeter (geschichtetes Holz unter Einschluss der Luftzwischenräume) [$\frac{\text{m}^3}{\text{a}}$]

ΔQ : zugeführter (benötigter) Energiebedarf für die beiden Feuerungen [$\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$]

$H_u(w)$: Heizwert der Strohpellets mit einem Wassergehalt von w [$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$]

ρ : Dichte des Schüttraummeters [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]

Während die jährliche Menge Strohpellets von 549,5 bis 618,6 t eine Lagerkapazität von 911 bis 1.026 m³ benötigt, muss für die gleiche Energiemenge, sofern diese über Pellets zur Verfügung gestellt wird, eine Lagerkapazität von 1.944 bis 2.189 m³ zerkleinertes Stroh eingeplant werden. Die jährliche Lagerkapazität von geschichtetem Stroh beträgt 1.593 bis 1.794 m³. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b)

Aus diesen Gründen bietet es sich an, die größte Lagermenge an Strohpellets bereit zu halten und die kleinste für das zerkleinerte Stroh, dass als Zwischenprodukt bei der Pelletierung dient. Hierfür kann beispielsweise das geschichtete Stroh, nachdem es zerkleinert wurde, direkt zu Pellets gepresst werden, so dass die Lagerkapazität von zerkleinertem Stroh nicht anfällt. Des weiteren kann Stroh zwei bis drei mal im Jahr geerntet werden, wodurch sich die Lagerkapazität um eben diesen Faktor verringert (Lewandowski 2009a).

5.3.4 Lagerkapazitäten der gewählten Energiepflanzen

Zusammenfassend zeigt Tabelle 5.8 die Lagerkapazitäten auf, die für jene Gewächshausbeheizung benötigt wird, um jeweils die Energiepflanzen Pappeln, Weiden oder Futtergräser in deren gewünschter Brennstoffform lagern zu können.

Tab. 5.8: Lagerkapazitäten der Brennstoffe

| | Weiden und Pappeln [$\frac{m^3}{a}$] | | Stroh [$\frac{m^3}{a}$] | |
|-------------|--|--------|---------------------------|--------|
| | Fall 1 | Fall 2 | Fall 1 | Fall 2 |
| Hackgut | | | | |
| Geschichtet | 2.585 | 2.296 | — | — |
| Gehackt | 3.155 | 2.802 | — | — |
| Pellets | | | | |
| Geschichtet | 1.758 | 1.561 | 1.794 | 1.593 |
| Pelletiert | 913 | 811 | 1.026 | 911 |

Quelle: Eigene Darstellung

Die Lagerkapazitäten fallen bei der Pelletherstellung geringer aus, als bei der Herstellung von Hackgut. Zudem unterliegen Lagerkapazität sowie Anbau und Ernte gewissen Abhängigkeiten. Futtergräser können zwei bis drei mal im Jahr geerntet werden, dies verringert entweder die Lagerkapazität um diesen Faktor oder den Flächenbedarf für den Anbau. Weiden und Pappeln können nur alle drei bis zehn Jahre geerntet werden, dies erhöht entweder die Lagerkapazität oder den Flächenbedarf für den Anbau. Jene Abhängigkeiten sowie der daraus resultierende Flächenbedarf für den Anbau wird im Folgenden beschrieben.

5.4 Anbau und Ernte

Der Flächenbedarf der für den Anbau benötigt wird, hängt von dem Zuwachs der Energiepflanzen sowie der benötigten Menge des Brennstoffs zur Wärmebereitstellung ab. Hierbei ist die Menge der Trockenmasse entscheidend, die sich folgendermaßen berechnet:

$$\Delta m_{TM} = \Delta Rm \cdot 0,3 \frac{t}{m^3}$$

Hackgut Fall 1:

$$775 \frac{t_{TM}}{a} \approx 2.585 \frac{m^3}{a} \cdot 0,3 \frac{t_{TM}}{m^3}$$

Hackgut Fall 2:

$$689 \frac{t_{TM}}{a} \approx 2.296 \frac{m^3}{a} \cdot 0,3 \frac{t_{TM}}{m^3}$$

5.4 Anbau und Ernte

Holzpellets Fall 1:

$$527 \frac{t_{TM}}{a} \approx 1.758 \frac{m^3}{a} \cdot 0,3 \frac{t_{TM}}{m^3}$$

Holzpellets Fall 2:

$$468 \frac{t_{TM}}{a} \approx 1.561 \frac{m^3}{a} \cdot 0,3 \frac{t_{TM}}{m^3}$$

Strohpellets Fall 1:

$$538 \frac{t_{TM}}{a} \approx 1.794 \frac{m^3}{a} \cdot 0,3 \frac{t_{TM}}{m^3}$$

Strohpellets Fall 2:

$$478 \frac{t_{TM}}{a} \approx 1.593 \frac{m^3}{a} \cdot 0,3 \frac{t_{TM}}{m^3}$$

Δm_{TM} : Menge der jährlich benötigten Trockenmasse [$\frac{kg}{a}$]

ΔR_m : Raummeter (geschichtetes Holz unter Einschluss der Luftzwischenräume) [$\frac{m^3}{a}$]

Über die (nach Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012a) berechneten Werte und dem jährlichen Trockenmassezuwachs der einzelnen Energiepflanzen, kann nun der Flächenbedarf ermittelt werden. Dies ist in Tabelle 5.9 dargestellt.

Tab. 5.9: Flächenbedarf für den Anbau der Energiepflanzen

| | | Trockenmasse [$\frac{t_{TM}}{a}$] | Zuwachs [$\frac{t_{TM}}{ha \cdot a}$] | | |
|--------------|--------|-------------------------------------|---|----------|-----------------|
| | | | Pappel: 10 | Weide: 7 | Futtergräser: 9 |
| | | | Anbaufläche [ha] | | |
| Hackgut | Fall 1 | 775 | 77,5 | 110,7 | — |
| | Fall 2 | 689 | 68,9 | 98,4 | — |
| Holzpellets | Fall 1 | 527 | 52,7 | 75,3 | — |
| | Fall 2 | 468 | 46,8 | 66,9 | — |
| Strohpellets | Fall 1 | 538 | — | — | 59,8 |
| | Fall 2 | 478 | — | — | 53,1 |

Quelle: Eigene Darstellung

Der Anbau von Pappeln benötigt in allen Fällen den niedrigsten Flächenbedarf und der von Weiden den Höchsten. Hinzu kommt, dass Pappeln und Weiden nur alle drei bis zehn Jahre geerntet werden können (Lewandowski 2009a). Dies hat zur Folge, dass entweder der drei- bis zehnfache Flächenbedarf oder die drei- bis zehnfache Lagerkapazität zur Verfügung gestellt werden muss, um jedes Jahr diese Menge ernten zu können. Futtergräser können hingegen zwei bis drei mal im Jahr geerntet werden (Lewandowski 2009a). Hierfür muss trotzdem die gleiche Fläche, wie in Tabelle 5.9 dargestellt, zur Verfügung gestellt werden, aber die Lagerkapazität verringert sich auf $\frac{1}{3}$ bzw. $\frac{1}{2}$.

Da der Flächenbedarf sowie die Lagerkapazität sehr hoch ausfallen, wird im Folgenden auf die Kosten für den Zukauf von Pellets und Hackschnitzeln eingegangen.

5.5 Kosten für den Ankauf von Hackgut und Pellets

Die Kosten für den Ankauf von Holzpellets und Hackschnitzeln werden jedes Jahr von dem Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Deutschland weit gemittelt herausgegeben. Die Preise für diese Brennstoffe haben sich in den letzten drei Jahren kaum verändert und ein starker Preisanstieg ist auch nicht zu erwarten (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2012b). Der Preis für Holzpellets beträgt etwa $0,05 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ und der für Hackschnitzel $0,03 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$. Bei einer zugeführten Energiemenge von 2.692 bzw. 3.031 $\frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ entspricht dies jährlichen Kosten von 134.600 bzw. 151.550 $\frac{\text{€}}{\text{a}}$ für Holzpellets und 80.760 bzw. 90.930 $\frac{\text{€}}{\text{a}}$ für Hackschnitzel. In diesen Preisen ist die Mehrwertsteuer sowie die Lieferung enthalten. (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2013)

Die folgende Tabelle 5.10 zeigt die Preise ohne Mehrwertsteuer und den Preis für die derzeitige Kohlemenge.

Tab. 5.10: Preise für Hackschnitzel, Holzpellets und Kohle

| | | Kosten [$\frac{\text{€}}{\text{a}}$] |
|-------------|--------|--|
| Kohle | | 73.500 |
| Hackgut | Fall 1 | 73.653 |
| | Fall 2 | 65.416 |
| Holzpellets | Fall 1 | 122.756 |
| | Fall 2 | 109.026 |

Quelle: Eigene Darstellung (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2013, 2012a)

Die Kosten für Hackgut sind demnach günstiger als die für Kohle. Weiterhin ist mit Preissteigerungen für Kohle zu rechnen, da ab 2014 keine Fördermittel der Bundesregierung mehr für den Abbau von Kohle bereitgestellt werden. Daher ist es langfristig betrachtet sinnvoll vom Brennstoff Kohle auf Hackschnitzel umzusteigen. Der Anbau von Energiepflanzen zur Wärmebereitstellung lohnt sich nicht, da der Flächenbedarf zu hoch ist. Denkbar ist eine Kombination aus Eigenanbau und Ankauf, um die Kosten zu minimieren.

Literaturverzeichnis

ARBLASTER, J. ; BRASSEUR, G. ; CHRISTENSEN, J.H. ; DENMAN, K.L. ; FAHEY, D.W. ; P. FORSTER, E. J. ; JONES, P.D. ; KNUTTI, R. ; TREUT, H. L. ; LEMKE, P. ; MEEHL, G. ; MOTE, P. ; RANDALL, D.A. ; STONE, D.A. ; TRENBERTH, K.E. ; WILLEBRAND, J. ; ZWIERS, F.: IPCC 2007 : Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: *Klimaänderung 2007 : Wissenschaftliche Grundlagen : Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*. 2007

BIOMASSEV: *Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - BiomasseV)*. Jun 2001

BP (Hrsg.): *BP Statistical Review of World Energy June 2012*. Version: Jun 2012. bp.com/statisticalreview, Abruf: 15.11.2012

BUND FÜR UMWELT UND NATURSCHUTZ DEUTSCHLAND E.V. (Hrsg.) ; BISCHÖFLICHES HILFSWERK MISEREOR E.V (Hrsg.): *Zukunftsfähiges Deutschland : Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung*. Basel : Birkhäuser GmbH, 1996. – ISBN 978-3-7643-5278-3

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (Hrsg.): *Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung : im Juni 1992 in Rio de Janeiro : -Dokument- : Agenda 21*. Version: Jun 1992. <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/agenda21.pdf>, Abruf: 13.07.2012

C.A.R.M.E.N. E.V. (Hrsg.): *Holzpellets - die Alternative zu Heizöl*. Version:2013. <http://www.carmen-ev.de/biogene-festbrennstoffe/brennstoffe/holzpellets/385-holzpellets-die-alternative-zu-heizoel>, Abruf: 29.05.2013

DAMRATH, Joachim ; GARTENBAU & LANDWIRTSCHAFT, Institut für Technik i. (Hrsg.): *Gartenbautechnische Information - Tabellen zur Heizenergieermittlung von Gewächshäusern - Klima Hamburg*. Universität Hannover, 1982

DEUTSCHER WETTERDIENST (Hrsg.): *Weltklima*. Version:2007. www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Oeffentlichkeit/KU/allgemeines/klimadaten_weltweit/download_xlsdatei,templateId=raw,property=publicationFile.xls/download_xlsdatei.xls, Abruf: 06.09.2012

DÖRING, Ralf ; ERNST-MORITZ-ARNDT-UNIVERSITÄT (Hrsg.): *Wie stark ist schwache, wie schwach starke Nachhaltigkeit?* Version:2004. <http://www.rsf.uni-greifswald.de/bwl/paper.html>, Abruf: 14.03.2013

- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (Hrsg.): *Basisdaten Bioenergie Deutschland*. Version: Aug 2012. <http://mediathek.fnr.de/broschuren/bioenergie/biokraftstoffe/basisdaten-bioenergie.html>, Abruf: 19.05.2013
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (Hrsg.): *Hackschnitzel-Heizungen*. Version: Aufl. 4, 2012. <http://mediathek.fnr.de/hackschnitzel-heizungen-marktubersicht.html>, Abruf: 27.05.2013
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE E.V. (Hrsg.): *Biobrennstoffe - Preise*. Version: 2013. <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/preise-und-kosten/biobrennstoffe-preise-interaktiv.html>, Abruf: 29.05.2013
- FERRO WÄRMETECHNIK GMBH (Hrsg.): *FERRO BIOMAT : Pellet / Hackgut / Getreide bis 2000kW*. Version: 2012. <http://www.ferro-waermetechnik.de/index.php?fbs-serie1>, Abruf: 28.05.2013
- Kapitel 7 Biomasse*. In: FISCHER, Joachim: *Regenerative Energietechnik*. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2009. – ISBN 978–3–540–95881–9, S. 323 ff
- FORKEL, Matthias: *Effektive Klimaklassifikation (z.B. Köppen)*. Version: Jan 2008. <http://www.klima-der-erde.de/kooppen.html>, Abruf: 18.02.2013
- HARTMANN, Hans ; HOFBAUER, Hermann ; KALTSCHMITT, Martin: In: KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; HARTMANN, Hans (Hrsg.): *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Aufl. 2. Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur : Springer, 2009. – ISBN 978–3–540–85094–6, Kapitel 9 Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung
- KALTSCHMITT, Martin: In: KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; HARTMANN, Hans (Hrsg.): *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Aufl. 2. Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur : Springer, 2009. – ISBN 978–3–540–85094–6, Kapitel 1 Einleitung und Zielsetzung
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NIEDERSACHSEN (Hrsg.): *Nur trockenes Holz hat einen hohen Heizwert*. Version: 2010. <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/betriebumwelt/nav/349/article/13741.html>, Abruf: 28.05.2013
- LEWANDOWSKI, Iris: In: KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; HARTMANN, Hans (Hrsg.): *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Aufl. 2. Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur : Springer, 2009. – ISBN 978–3–540–85094–6, Kapitel 3 Angebaute Biomasse
- LEWANDOWSKI, Iris: In: KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; HARTMANN, Hans (Hrsg.): *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Aufl. 2. Berlin ; Heidelberg ; New

- York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur : Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-85094-6, Kapitel 2 Biomasseentstehung
- NUSSBAUER, Thomas ; HARTMANN, Hans ; HOFBAUER, Hermann ; GOOD, Jürgen: In: KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; HARTMANN, Hans (Hrsg.): *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Aufl. 2. Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur : Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-85094-6, Kapitel 10 Direkte thermo-chemische Umwandlung (Verbrennung)
- PAUS, Hans J.: *Physik in Experimenten und Beispielen*. München : Carl Hanser Verlag, 2002. – ISBN 3-446-22135-2
- QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme : Technologie - Berechnung - Simulation*. Aufl. 5. München : Carl Hanser Verlag, 2007. – ISBN 978-3-446-40973-6
- RAHMSTORF, Stefan ; SCHELLNHUBER, Hans J.: *DER KLIMAWANDEL : Diagnose, Prognose, Therapie*. Aufl. 6. München : Verlag C.H. Beck oHG, 2007. – ISBN 978-3-406-50866-0
- RAT FÜR NACHHALTIGE ENTWICKLUNG (Hrsg.): *Der Rat*. Version: Aug 2012. <http://www.nachhaltigkeitsrat.de/der-rat/>, Abruf: 10.08.2012
- SCHOLZ, Volkhard ; BOELCKE, Barbara ; BURGER, Frank ; HOFMANN, Martin ; VETTER, Armin ; AGRARTECHNIK POTSDAM-BÖRNIM E.V., Leibniz-Institut für (Hrsg.) ; FISCHEREI MECKLENBURG-VORPOMMERN, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft u. (Hrsg.) ; FORSTWIRTSCHAFT, Bayerische L. u. (Hrsg.) ; E.V., Kompetenzzentrum H. (Hrsg.) ; LANDWIRTSCHAFT, Thüringer L. (Hrsg.): *KTBL-Datensammlung Energiepflanzen : MERKBLATT : Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen*. Version: Jul 2006. http://dendrom.de/daten/downloads/ktbl_merkblatt.pdf, Abruf: 08.04.2013
- SCHRADER, Karl ; DIETRICH, Rainer: *Gewächshäuser und Heizungsanlagen im Gartenbau*. Stuttgart : Eugen Ulmer KG, 2011. – ISBN 978-3-8001-7582-6
- SEEN, Thomas: In: KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; HARTMANN, Hans (Hrsg.): *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Aufl. 2. Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur : Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-85094-6, Kapitel 15 Ethanolerzeugung und Nutzung
- VOLLSTÄDT, Simone: *Geschichte der Marschlande*. In: GESCHICHTSKONTOR, Kultur-& (Hrsg.): *Marschlande : Kulturgeschichte zwischen Elbe und Bille*. Hamburg : Kultur-& Geschichtskontor, 2011. – ISBN 978-3-942998-01-7

- WEHRSPAUN, Michael ; EICK, Martina ; LÖWE, Christian ; SCHLÜNS, Julia: *Nachhaltigkeitspolitik, soziokultureller Wandel und Ökologische Gerechtigkeit : Problemaufriss zum UBA-WI-Fachgespräch (am 12.5.05): : „Wohlfahrt und Nachhaltigkeit als neues Thema der Nachhaltigkeitsforschung“*. Version: Mai 2005. https://www.google.com/url?q=http://www.umweltbundesamt.de/umweltbewusstsein/publikationen/oeg-problemaufriss.pdf&sa=U&ei=gRdDUY_SIfCP7AaSp4DwDA&ved=0CAcQFjAA&client=internal-uds-cse&usg=AFQjCNHPDX5Iy4peChHM15kVS21Ja__L6Q, Abruf: 15.03.2013
- WIDMANN, Bernhard ; STELZER, Thomas ; REMMELE, Edger ; KALTSCHMITT, Martin: In: KALTSCHMITT, Martin (Hrsg.) ; HARTMANN, Hans (Hrsg.): *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Aufl. 2. Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur : Springer, 2009. – ISBN 978-3-540-85094-6, Kapitel 13 Produktion und Nutzung von Pflanzenölkraftstoffen
- WILBERS, Karl: Bildung für ein nachhaltiges Wirtschaften aus einer curricularen Perspektive - Relevanz, Probleme, Optionen. In: TIEMEYER, Ernst (Hrsg.) ; WILBERS, Karl (Hrsg.): *Berufliche Bildung für ein nachhaltiges Wirtschaften : Konzepte - Curricula - Methoden - Beispiele*. Bielefeld : W. Bertelsmann Verlag GmbH & Co. KG, 2006. – ISBN 978-3-7639-3422-5, Kapitel B Bildung für nachhaltiges Wirtschaften: Curriculare Bezugspunkte
- WORLD COMMISSION ON ENVIROMENT AND DEVELOPMENT (Hrsg.): *“Our Common Future” („Brundtland-Bericht“)*. Version: Aug 1987. www.bne-portal.de/coremedia/generator/unesco/de/Downloads/Hintergrundmaterial__international/Brundtlandbericht.pdf, Abruf: 16.07.2012
- WWF INTERNATIONAL (Hrsg.) ; INSTITUTE OF ZOOLOGY (Hrsg.) ; GLOBAL FOOTPRINT NETWORK (Hrsg.) ; EUROPEAN SPACE AGENCY (Hrsg.): *Living Planet Report 2012 : Biodiversity, biocapacity and better choices*. millerdesign.co.uk, 2012. – ISBN 978-2-940443-37-6

Anhang

Produktbeschreibung

Sorte: Anthrazit-Nuss 5 getr. (F051) Korngröße: 16 - 7 mm
 (Gültig ab dem 1. Juli 2008)

Grundanalyse

| Parameter | Bestimmung nach DIN | Werte | Dimension |
|-----------------------------|---------------------|---------------|-----------|
| Wasser (roh) | 51718 | 2 - 4 | Gew. % |
| Asche (wf) | 51719 | 3 - 6 | Gew. % |
| Flüchtige Bestandteile (wf) | 51720 | 4 - 6 | Gew. % |
| C-fix (wf) | Rechenwert | 88 - 93 | Gew. % |
| Heizwert (roh) | 51900 | 31200 - 33600 | kJ/kg |
| Heizwert (wf) | 51900 | 32600 - 34300 | kJ/kg |

Elementaranalyse

| Element | | Bestimmung nach DIN | Werte | Dimension |
|------------------|----|---------------------|-------------|-----------|
| Schwefel (roh) | S | 51724 | < 1 | Gew. % |
| Phosphor (wf) | P | 51725 | < 0,04 | Gew. % |
| Chlor (wf) | Cl | 51727 | < 0,15 | Gew. % |
| Fluor (wf) | F | 51723 | < 0,02 | Gew. % |
| Kohlenstoff (wf) | C | 51732 | 86,5 - 92,5 | Gew. % |
| Sauerstoff (wf) | O | Rechenwert | < 2,5 | Gew. % |
| Wasserstoff (wf) | H | 51732 | 2,8 - 3,3 | Gew. % |
| Stickstoff (wf) | N | 51732 | 1 - 1,2 | Gew. % |

Körnungsaufbau (Bestimmung nach DIN 23006)

| Körnung in mm | Werte | Dimension |
|---------------|--------|-----------|
| > 16 | ca. 2 | Gew. % |
| 16 - 7 | ca. 95 | Gew. % |
| < 7 | ca. 3 | Gew. % |

Mahlbarkeit: (Bestimmung nach DIN 51742)

| Werte | Dimension |
|---------|-----------|
| 25 - 45 | °H |

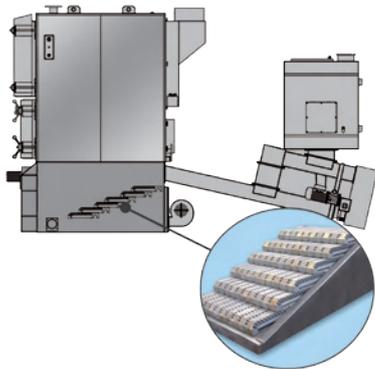
Schüttdichte (Bestimmung nach DIN 51705, Angabe ± 30 kg/m³)

| Werte | Dimension |
|---------|-------------------|
| ca. 790 | kg/m ³ |

Anthrazit ist ein Naturprodukt, dessen Qualität natürlichen Schwankungen unterliegt. Bei den oben genannten Angaben handelt es sich **nicht** um Garantiewerte, sondern um eine Beschreibung des Produktes, die auf Erfahrungswerten aus der Vergangenheit beruht. Abweichungen hiervon sind möglich. Alle Angaben gelten ab Zeche.

Gesamtwärmebedarf für ein Gewächshaus

| Gesamtwärmebedarf für ein Gewächshaus [kWh/m²] (nach Damrath) | | | | | | | | | | | |
|---|---|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Woche | Gewächshaus-Innentemperatur [°C] | | | | | | | | | | |
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 1 | 2,41 | 3,75 | 5,49 | 7,64 | 10,05 | 12,60 | 15,21 | 17,89 | 20,75 | 23,18 | 25,86 |
| 2 | 3,08 | 4,36 | 6,10 | 8,17 | 10,45 | 12,93 | 15,54 | 18,09 | 20,70 | 23,38 | 26,00 |
| 3 | 3,02 | 4,22 | 5,83 | 7,77 | 10,05 | 12,46 | 15,01 | 17,62 | 20,30 | 22,98 | 25,59 |
| 4 | 1,27 | 2,28 | 3,69 | 5,56 | 7,77 | 10,18 | 12,73 | 15,41 | 18,02 | 20,70 | 23,45 |
| 5 | 2,28 | 3,35 | 4,89 | 6,77 | 8,91 | 11,32 | 13,80 | 16,42 | 19,03 | 21,64 | 24,32 |
| 6 | 2,01 | 3,15 | 4,69 | 6,70 | 8,91 | 11,32 | 13,87 | 16,48 | 19,10 | 21,78 | 24,39 |
| 7 | 2,41 | 3,82 | 6,23 | 7,64 | 9,78 | 12,13 | 14,61 | 25,40 | 19,63 | 22,18 | 24,72 |
| 8 | 1,68 | 2,61 | 4,09 | 5,83 | 7,84 | 9,98 | 12,33 | 14,74 | 17,22 | 19,70 | 22,31 |
| 9 | 1,54 | 2,55 | 3,69 | 5,23 | 6,90 | 8,98 | 11,06 | 13,07 | 15,68 | 18,09 | 20,57 |
| 10 | 1,27 | 2,01 | 3,15 | 4,49 | 6,23 | 8,11 | 10,12 | 12,33 | 14,61 | 17,09 | 19,50 |
| 11 | 0,74 | 1,47 | 2,55 | 4,02 | 5,70 | 7,64 | 9,85 | 12,06 | 14,47 | 16,88 | 19,43 |
| 12 | 0,40 | 0,94 | 1,81 | 3,02 | 4,49 | 6,23 | 8,11 | 10,25 | 12,40 | 14,67 | 17,09 |
| 13 | 0,20 | 0,54 | 1,27 | 2,28 | 3,75 | 5,36 | 7,24 | 9,18 | 11,32 | 13,53 | 15,88 |
| 14 | 0,07 | 0,27 | 0,74 | 1,61 | 2,68 | 4,09 | 5,56 | 7,30 | 9,05 | 11,06 | 13,07 |
| 15 | 0,07 | 0,27 | 0,74 | 1,41 | 2,41 | 3,62 | 5,03 | 6,50 | 8,17 | 9,85 | 11,73 |
| 16 | 0,07 | 0,20 | 0,54 | 1,07 | 1,81 | 2,75 | 4,02 | 5,36 | 6,90 | 8,58 | 10,32 |
| 17 | 0,07 | 0,20 | 0,40 | 0,87 | 1,61 | 2,61 | 3,75 | 5,03 | 6,70 | 8,31 | 10,05 |
| 18 | -- | 0,07 | 0,20 | 0,47 | 1,01 | 1,74 | 2,75 | 3,95 | 5,23 | 6,70 | 8,31 |
| 19 | -- | 0,07 | 0,07 | 0,20 | 0,47 | 0,94 | 1,74 | 2,75 | 4,02 | 5,36 | 6,77 |
| 20 | -- | -- | 0,07 | 0,20 | 0,54 | 1,14 | 1,94 | 2,95 | 4,02 | 5,36 | 6,77 |
| 21 | -- | -- | -- | 0,13 | 1,40 | 0,87 | 1,61 | 2,68 | 3,89 | 5,16 | 6,63 |
| 22 | -- | -- | 0,07 | 0,13 | 0,34 | 0,80 | 1,47 | 2,35 | 3,48 | 4,76 | 6,10 |
| 23 | -- | -- | -- | 0,07 | 0,13 | 0,34 | 0,80 | 1,41 | 2,28 | 3,22 | 4,36 |
| 24 | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,34 | 0,67 | 1,34 | 2,08 | 3,15 | 4,22 |
| 25 | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,13 | 0,54 | 1,01 | 1,88 | 2,81 | 3,95 |
| 26 | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,20 | 0,47 | 1,07 | 1,88 | 2,88 | 4,09 |
| 27 | -- | -- | -- | -- | -- | 0,13 | 0,47 | 1,07 | 1,88 | 2,95 | 4,15 |
| 28 | -- | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,27 | 0,80 | 1,47 | 2,41 | 3,48 |
| 29 | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,13 | 0,34 | 0,67 | 1,41 | 2,35 | 3,42 |
| 30 | -- | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,27 | 0,74 | 1,41 | 2,28 | 3,42 |
| 31 | -- | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,20 | 0,60 | 1,34 | 2,28 | 3,28 |
| 32 | -- | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,27 | 0,67 | 1,34 | 2,28 | 3,48 |
| 33 | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,07 | 0,34 | 0,87 | 1,74 | 2,81 | 4,02 |
| 34 | -- | -- | -- | 0,07 | -- | 0,20 | 0,47 | 1,07 | 1,94 | 3,08 | 4,36 |
| 35 | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,20 | 0,60 | 1,21 | 2,14 | 3,35 | 4,69 |
| 36 | -- | -- | -- | -- | 0,07 | 0,27 | 0,74 | 1,47 | 2,48 | 3,82 | 5,29 |
| 37 | -- | -- | -- | 0,07 | 0,20 | 0,47 | 1,01 | 1,88 | 3,02 | 4,36 | 5,83 |
| 38 | -- | -- | 0,07 | 0,13 | 0,34 | 0,80 | 1,47 | 2,61 | 3,82 | 5,36 | 6,97 |
| 39 | -- | -- | -- | 0,07 | 0,40 | 0,87 | 1,74 | 2,81 | 4,22 | 5,83 | 7,57 |
| 40 | -- | 0,07 | 0,13 | 0,34 | 0,60 | 1,27 | 2,08 | 3,35 | 4,96 | 6,63 | 8,58 |
| 41 | -- | 0,07 | 0,20 | 0,47 | 0,80 | 1,61 | 2,75 | 4,15 | 5,76 | 7,71 | 9,65 |
| 42 | 0,07 | 0,07 | 0,27 | 0,67 | 1,41 | 2,61 | 4,09 | 5,83 | 7,77 | 9,78 | 11,93 |
| 43 | -- | 0,07 | 0,27 | 0,67 | 1,41 | 2,55 | 4,09 | 5,90 | 7,97 | 10,12 | 12,46 |
| 44 | 0,07 | 0,27 | 0,67 | 1,27 | 2,28 | 3,69 | 5,49 | 7,17 | 9,78 | 12,19 | 14,61 |
| 45 | 0,20 | 0,47 | 0,94 | 1,88 | 3,28 | 5,09 | 7,10 | 9,38 | 11,73 | 14,20 | 16,75 |
| 46 | 0,34 | 0,74 | 2,14 | 2,68 | 4,42 | 6,43 | 8,78 | 11,19 | 13,80 | 16,48 | 19,16 |
| 47 | 0,67 | 1,27 | 2,28 | 3,62 | 5,43 | 7,50 | 9,85 | 12,40 | 14,94 | 17,55 | 20,23 |
| 48 | 0,67 | 1,21 | 2,14 | 3,69 | 5,63 | 7,97 | 10,39 | 12,93 | 15,61 | 18,22 | 20,84 |
| 49 | 1,01 | 1,21 | 3,15 | 4,96 | 7,04 | 9,45 | 12,06 | 14,74 | 17,35 | 20,10 | 22,85 |
| 50 | 1,41 | 2,35 | 3,75 | 5,43 | 7,57 | 9,92 | 12,46 | 15,08 | 17,76 | 20,30 | 22,91 |
| 51 | 2,14 | 3,28 | 4,82 | 6,77 | 8,71 | 11,46 | 13,94 | 16,48 | 19,03 | 21,71 | 24,25 |
| 52 | 2,48 | 3,55 | 5,09 | 6,97 | 9,18 | 11,59 | 14,20 | 16,82 | 19,56 | 22,18 | 24,86 |
| Summe | 31,65 | 50,76 | 82,23 | 121,04 | 172,42 | 233,37 | 305,30 | 394,53 | 477,04 | 573,33 | 674,52 |



FERRO BIOMAT FBS mit Stufen-Schubrost für Hackgut bis 60% Feuchte, Holzpellets, Agropellet, Späne, Sägemehl, Schalen im Leistungsbereich von 10 - 2.000kW

FERRO Biomasse FBS Heizsysteme mit Stufenrost versorgen ein breites Spektrum von Wohn- und Kommunalgebäuden bis hin zu sogenannten Mikronetzen (Versorgung von mehreren Einzelgebäuden). Wärmeerzeuger bis 300 kW sind nach EN 303.5 Gruppe 3 geprüft und zugelassen. Ab 400kW Nennleistung dient eine Druckkörperprüfung mit CE – Bescheinigung, vor Ort ist eine feuerungstechnische Einzelprüfung erforderlich.

Die maximal zulässige Vorlauftemperatur beträgt 98° C, der Betriebsdruck 3 bar. Der Heizbetrieb von 30 bis 100 % der Nennleistung wird modulierend dem tatsächlichen Wärmebedarf angepasst/geregelt. Bei geringerem Leistungsbedarf schaltet der Wärmeerzeuger auf „Gluterhaltung“ um und erzeugt dabei ca. 5 % Wärme, bezogen auf jeweilige Nennleistung, die abgeführt werden muss.

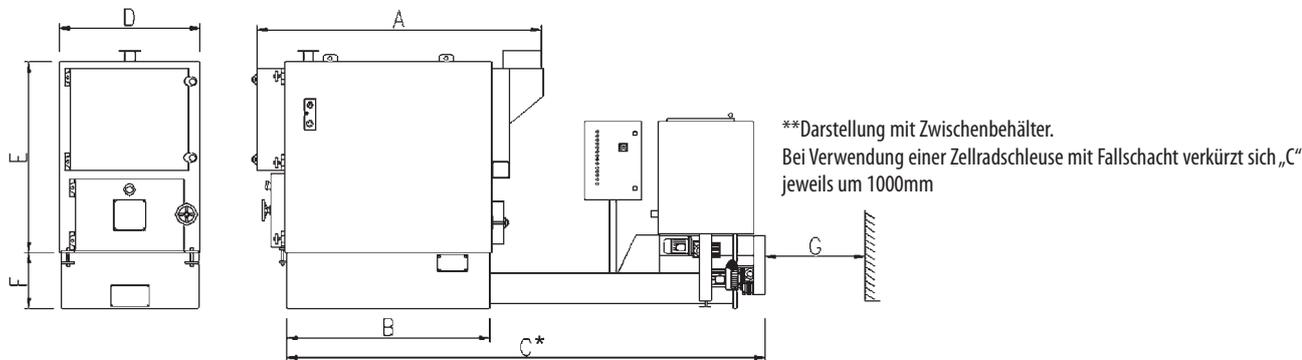
Ein Doppel-Stokersystem mit Fallschacht reguliert die Brennstoffzufuhr automatisch von einem Tagesbehälter in den Brennraum. Die automatische Entaschung mit Aschentonne, Schnecke, Motor und Getriebe zählt zum Lieferumfang. Das Dreizug-Kesselsystem ist aus Stahlblech gefertigt. Der Brennerherd besteht aus Guss und Schamotteausmauerung. Die Verbrennungsluft Primär- und Sekundärseitig wird über eine Lambdasondenregelung optimiert. Die Schaltschrankanlage, die elektr. Ansteuerung, Vorverdrahtung und Funktion ist im Werk einzeln geprüft.

Die komplette Verkabelung und Verdrahtung zählen zum Lieferumfang.

Der Kesselherd, der wasserführende Wärmeerzeuger, das Stokersystem, das Silo und Elektroschaltschrank, die Kesselverkleidung werden – einwegverpackt – getrennt geliefert und sind vor Ort zu komplettieren. Dadurch wird die Einbringung erleichtert.

| Typ | Nennleistung* | Wirkungsgrad | CO-Gehalt* | Staub* | Abgastemperatur | Gewicht | Abgasanschluss | Siloinhalt** | Bestell-Nr. | Preis € |
|---------|---------------|--------------|----------------------|----------------------|-----------------|-------------|----------------|--------------|-------------|-------------|
| | [kW] | [%] | [mg/m ³] | [mg/m ³] | [°C] | [kg] | [mm] | [ltr.] | | |
| FB30S | 10-30 | >90 | <250 | <20 | 120-160 | 680 | 180 | 450 | 04650031 | 18.330,00 |
| FB45S | 15-45 | >90 | <250 | <20 | 120-160 | 700 | 180 | 450 | 04650051 | 19.391,00 |
| FB60S | 20-60 | >90 | <250 | <20 | 120-160 | 800 | 200 | 450 | 04650061 | 21.123,00 |
| FB80S | 27-80 | >90 | <250 | <20 | 120-160 | 850 | 200 | 450 | 04650081 | 22.869,00 |
| FB100S | 33-100 | >90 | <250 | <20 | 120-160 | 920 | 200 | 450 | 04650101 | 25.937,00 |
| FB130S | 45-130 | >90 | <250 | <20 | 120-180 | 950 | 250 | 560 | 04650131 | 35.058,00 |
| FB180S | 60-180 | >90 | <250 | <20 | 120-180 | 1300 | 250 | 560 | 04650181 | 40.037,00 |
| FB230S | 75-230 | >90 | <250 | <20 | 120-180 | 1650 | 250 | 560 | 04650231 | 45.187,00 |
| FB300S | 100-300 | >90 | <250 | <20 | 120-180 | 2400 | 300 | 560 | 04650301 | 58.776,00 |
| FB400S | 135-400 | >90 | <250 | <20 | 120-180 | 2800 | 350 | 560 | 04650401 | 71.123,00 |
| FB500S | 165-500 | >90 | <250 | <20 | 120-180 | 3250 | 350 | 560 | 04650501 | 75.456,00 |
| FB650S | 220-650 | >90 | <250 | <20 | 120-180 | 4350 | 450 | 560 | 04650651 | 90.383,00 |
| FB800S | 265-800 | >90 | <250 | <20 | 120-180 | auf Anfrage | 450 | 560 | 04650801 | auf Anfrage |
| FB950S | 320-950 | >90 | auf Anfrage | auf Anfrage | auf Anfrage | auf Anfrage | 450 | 560 | 04650951 | auf Anfrage |
| FB1300S | 450-1300 | >90 | auf Anfrage | auf Anfrage | auf Anfrage | auf Anfrage | 450 | auf Anfrage | 04651301 | auf Anfrage |
| FB1650S | 550-1650 | >90 | auf Anfrage | auf Anfrage | auf Anfrage | auf Anfrage | 450 | auf Anfrage | 04651651 | auf Anfrage |
| FB2000S | 670-2000 | >90 | auf Anfrage | auf Anfrage | auf Anfrage | auf Anfrage | 450 | auf Anfrage | 04651201 | auf Anfrage |

*Leistung bei Brennstoff Holzpellet nach DIN oder Ö-Norm bei 13% O₂; für andere Brennstoffe ist eine Abgasreinigung aus dem FERRO-Lieferprogramm empfohlen/erforderlich



| | FBS30 | FBS45 | FBS60 | FBS80 | FBS100 | FBS130 | FBS180 | FBS230 | FB300S | FB400S | FB500S | FB650S | FB800S | FB950S |
|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A [mm] | 900 | 900 | 1100 | 1420 | 1580 | 1450 | 1750 | 2050 | 2030 | 2380 | 2730 | 2760 | 3210 | 3600 |
| B [mm] | 550 | 550 | 750 | 1060 | 1160 | 950 | 1250 | 1550 | 1480 | 1830 | 2180 | 2040 | 2490 | 2940 |
| C [mm] | 2630 | 2630 | 2630 | 2630 | 2630 | 3300 | 3400 | 3400 | 4180 | 4180 | 4180 | 5150 | 5150 | 5150 |
| D [mm] | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 970 | 970 | 970 | 1250 | 1250 | 1250 | 1500 | 1500 | 1500 |
| E [mm] | 950 | 950 | 950 | 950 | 1000 | 1350 | 1350 | 1350 | 1730 | 1730 | 1730 | 2000 | 2000 | 2000 |
| F [mm] | 330 | 330 | 330 | 330 | 330 | 430 | 430 | 430 | 500 | 500 | 500 | 550 | 550 | 500 |
| G [mm] | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 1780 | 1780 | 1780 | 2230 | 2230 | 2230 | 2550 | 2550 | 2500 |

FB1300S, FB1650S, FB2000S auf Anfrage