

Vorerst auf kleinere Windenergieanlagen konzentrieren

Fördergesellschaft Windenergie gegründet / Referat von Erich Hau

Am 4. November 1985 wurde in Kiel die „FGW Fördergesellschaft Windenergie e.V.“ gegründet, der als ordentliche Mitglieder Firmen und Organisationen und Privatpersonen als Außerordentliche Mitglieder angehören können. In den Vorstand der FGW sind gewählt worden: Dr.-Ing. G. Clausnitzer als Vorsitzender (Hamburgische Electricitätswerke), Dipl.-Ing. Pleß (Germanischer Lloyd), Dr.-Ing. Grüninger (DFVLR), Ing. H. Frees (Windkraft-Zentrale, Brodersby/Kappeln) und Dipl.-Ing. Erich Hau (M.A.N. Technologie GmbH). Anlässlich der Gründungsversammlung hielt Hau das nachfolgend wiedergegebene Referat über den Entwicklungsstand der Windenergienutzung sowie einige der künftigen Aufgaben.

Wenn wir uns den Stand der Wind-energie-technik im Jahre 1985 vergegenwärtigen, so können wir zunächst auf ein kleines Jubiläum hinweisen. Ein Jubiläum insofern, als die neuere technologische Entwicklung auf diesem Gebiet ziemlich genau einen Zeitraum von zehn Jahren umfaßt. Etwa ab 1975, also nach der vielzitierten Energiekrise, setzten in zahlreichen Industriestaaten Bemühungen ein, die Windenergie als eine der regenerativen Energiequellen zur Energieerzeugung nutzbar zu machen. In erster Linie, wenn auch nicht ausschließlich, werden Windenergiekonverter – heute sagen wir eher Windkraftanlagen – für die Erzeugung von elektrischer Energie entwickelt.

Die Nutzung der Windenergie zur Erzeugung von elektrischer Energie kann man mit einigem Recht als eine Wiederentdeckung bezeichnen. Immerhin reichen die ersten Versuche bis ins letzte Jahrhundert zurück. In den vierziger und fünfziger Jahren unseres Jahrhunderts wurden in mehreren Ländern zahlreiche Versuchsanlagen mit Leistungen bis über 1000 kW verwirklicht. Dieser Hinweis scheint mir insofern wichtig, als die heutigen technischen Systeme in mancher Hinsicht noch von den Erkenntnissen und Erfahrungen geprägt sind, die einige Jahrzehnte zurückliegen. Wenn wir uns also die Fragen stellen: Wo stehen wir heute und welche Aufgaben liegen vor uns, so tun wir dies vor dem Hintergrund einer Dekade der neueren technologischen Entwicklung und ganz bestimmter Traditionen auf diesem Gebiet.

Beachtliche Förderung

Was die letzten zehn Jahre von der historischen Entwicklung unterscheidet, ist vor allem die Tatsache, daß der Versuch unternommen worden ist, diese Technologie systematisch und breit angelegt voranzutreiben. Ob das in jedem Falle gelungen ist, darüber läßt sich sicher im Einzelfall streiten. Der Einsatz von Mitteln – vor allen Dingen von staatlichen Fördermitteln – war jedenfalls beachtlich. Hierzu einige Zahlen:

- In den USA wurden seit etwa 1975 rund 600 Mill. Dollar an öffentlicher Förderung für die Windenergieforschung aufgewendet,
- in der Bundesrepublik waren es über 220 Mill. DM,

- in Schweden nahezu 100 Mill. DM.

In einer Reihe von weiteren Ländern wie Dänemark, Holland und Großbritannien werden nationale Technologieprogramme ähnlicher Größenordnung gefördert. In den letzten Jahren sind aber auch die privaten Anstrengungen auf diesem Gebiet stark gestiegen. Es ist also keineswegs so, daß nur da und dort etwas getan wird, wenn der Staat bezahlt.

Als vor zehn Jahren die nationalen Forschungsprogramme auf dem Gebiet der regenerativen Energiesysteme konzipiert wurden, standen wir alle unter dem Eindruck einer heraufziehenden energetischen Endzeit, was die Versorgung mit fossilen Energieträgern betrifft. Zum Glück haben sich die Befürchtungen in dieser Form nicht bestätigt. Dennoch, damals wurden die regenerativen Energiequellen von Vielen als „alternative“ Energiequellen angesehen.

Zunächst Großanlagen

Die Erwartung, eine Alternative zu den konventionellen Energieträgern werden zu können, war allerdings nur dann zu rechtfertigen, wenn die regenerativen Energiesysteme auch hinsichtlich ihrer Leistungsabgabe mit den konventionellen Kraftwerken vergleichbar sein würden. Es war deshalb nicht mehr als konsequent, daß sich die nationalen Forschungs- und Entwicklungsprogramme zunächst auf die Realisierung von Systemen im Megawatt-Leistungsbereich konzentrierten. Für Windkraftanlagen bedeutete dies, daß die Größe der Rotoren bis an die Grenze des technisch Machbaren getrieben werden mußte. Um Leistungen von einigen Megawatt bei vernünftigen Windgeschwindigkeiten zu erzielen, sind Rotorgrößen von mindestens 70 bis 80 m erforderlich. Die Grenze des Machbaren wurde bei etwa 120 m Durchmesser gesehen.

In der Folgezeit entstanden mit dieser Zielsetzung große Versuchsanlagen zunächst in den USA, dann in Schweden und in der Bundesrepublik. Bis heute wurden etwa zehn Anlagen mit Nennleistungen von mehreren Megawatt realisiert: die leistungsstärkste Anlage, eine amerikanische mit 4000 kW Nennleistung, und die größte Anlage mit 100 m Rotordurchmesser in der Bundesrepublik, das Projekt „Growian“.

Über den Sinn dieser Großanlagen ist in letzter Zeit kontrovers diskutiert wor-

den. Vor allen Dingen bei uns, da wir mit „Growian“, der größten Anlage, auch die größten technischen Schwierigkeiten hatten. Der allgemein erreichte Stand der Entwicklung läßt sich an Hand einiger Zahlen erkennen:

Die fünf amerikanischen MOD-2-Anlagen mit einer Leistung von je 2500 kW bei einem Rotordurchmesser von 91 m haben im Zeitraum von 1981 bis Ende 1984 insgesamt 9200 Betriebsstunden erreicht. Die jährliche Betriebsstundenzahl, die in den ersten beiden Jahren nur sehr gering war, konnte zum Beispiel bei einer der Anlagen auf 2760 Stunden im Jahr 1983 gesteigert werden. Das entspricht einer technischen Jahresverfügbarkeit von etwa 60 Prozent. Eine ähnliche Verfügbarkeit hat im Jahr 1984 auch eine der großen schwedischen Versuchsanlagen mit einer Leistung von 3000 kW bei 78 m Rotordurchmesser erreicht.

Die Jahresenergielieferung entsprach in beiden Fällen sehr genau den vorausgerechneten Werten oder lag sogar etwas darüber.

Eine technische Verfügbarkeit von 60 Prozent ist natürlich für den kommerziellen Einsatz noch bei weitem zu gering. Unter technologischen Gesichtspunkten betrachtet aber sicher ermutigend, wenn man berücksichtigt, daß es sich um Versuchsanlagen der ersten Generation handelt. Mit Blick auf einen kommerziellen Einsatz muß allerdings auch erwähnt werden, daß die Investitionskosten für diese großen Anlagen noch erheblich über dem liegen, was betriebswirtschaftlich zu rechtfertigen ist. Windkraftanlagen dieser extremen Größe sind deshalb noch auf absehbare Zeit für eine kommerzielle Nutzung zu unwirtschaftlich. Dies muß man realistisch zugestehen.

Mittlere Anlagen günstiger

Erheblich günstiger sieht das Bild für mittelgroße Anlagen im Leistungsbe- reich von 500 bis etwa 1500 kW mit Rotordurchmessern von 40 bis 60 m aus. In dieser Größenklasse waren vor allen die Dänen mit den beiden Nibe-Versuchsanlagen erfolgreich. Diese beiden Anlagen mit einem Rotordurchmesser von 40 m und einer Leistung von je 630 kW haben seit 1981 rund 4 Mill. kWh geliefert. Das Modell Nibe B hat 1984 mit 4450 Betriebsstunden eine technische Verfügbarkeit von 86 Prozent erreicht.

Anlagen dieser Größenklasse werden heute weltweit als die erste Generation von kommerziell einsetzbaren großen Windkraftanlagen angesehen. In nahezu allen Ländern, die sich in größerem Umfang mit der Windenergie-technik befassen, sind Anlagen mit einer Leistung um 1 MW in der Entwicklung oder werden bereits erprobt. In Europa konzentriert sich vor allem die Kommission der Europäischen Gemeinschaft,

die seit etwa zwei Jahren ein beachtliches Förderprogramm für die Windenergietechnik aufgelegt hat, auf die Forschung und Entwicklung und die Anwendungsdemonstration für Windkraftanlagen dieser Größenklasse. In der Bundesrepublik wird, gefördert durch die EG und das Bundesforschungsministerium, eine Anlage entwickelt, deren erster Prototyp für die Insel Helgoland vorgesehen ist. Diese Anlage basiert in vieler Hinsicht auf den Erfahrungen und Technologien, die mit „Growian“ gewonnen wurden. Darüber hinaus gibt es konkrete Pläne, auch die Einblatt-Konzeption „Monopteros“ in der Leistungs-kategorie um 1 MW weiterzuentwickeln.

Groß gegen Klein?

Die Diskussion um die beste Form der Windenergienutzung ist leider oft von einem unnötigen Gegensatz geprägt, den man verkürzt als „groß gegen klein“ bezeichnen kann. Die großen Windkraftanlagen haben in den Augen einiger Kritiker unter anderem den Nachteil, daß sie in die bestehende Versorgungsstruktur integriert werden müssen. Oder mit anderen Worten: Diese Anlagen können nur auf der Seite der Energieerzeuger als additive Energiesysteme im bestehenden Kraftwerksverbund betrieben werden.

Kleine Anlagen in einem Leistungsbereich von etwa 10 bis 100 kW sind dagegen auf der Energieverbraucherseite einsetzbar. Das hat unbestreitbar einige Vorteile. Vor allem ist die wirtschaftliche Situation wesentlich günstiger, da der Wert der erzeugten Kilowattstunden am Verbraucherpreis gemessen werden kann. Dieser liegt um den Faktor zwei bis drei über dem Brennstoffanteil der Energieerzeugungskosten, der für die großen Anlagen im Kraftwerksverbund das betriebswirtschaftliche Äquivalent bildet.

Darüber hinaus sind die spezifischen Investitionskosten für kleine Anlagen zumindest heute noch wesentlich günstiger. Dies liegt zum einen an den weit aus geringeren Aufwendungen für Forschung und Entwicklung, vor allem aber an der Tatsache, daß mit kleinen Einheiten wesentlich schneller eine kostensenkende Serienfertigung erreicht werden konnte. Weiterhin spielt eine gewisse – wenn auch nicht entscheidende – Rolle, daß Windkraftanlagen unterhalb einer bestimmten Größe konstruktiv einfacher ausgestattet werden können.

Die geringeren spezifischen Baukosten für kleine Anlagen sind heute in der Tat ein bemerkenswertes Faktum, da sie in einem gewissen Gegensatz zu den üblichen Erfahrungen zu stehen scheinen. Eine typische Kleinanlage mit 15 m Rotordurchmesser und einer Nennleistung von etwa 50 kW wird heute mit etwa 500 bis 600 DM/m² Rotorkreisfläche produziert, für die existierenden Großanlagen liegt dieser Wert bei einigen Tausend DM/m². Hierbei muß allerdings berücksichtigt werden,

daß große Anlagen auch spezifisch teurer sein dürfen. Schon wegen der größeren Höhe des Rotors über dem Boden steigt aufgrund der zunehmenden Windgeschwindigkeit die spezifische Energielieferung des Rotors je Flächeneinheit. Selbstverständlich sind bei einem solchen Vergleich auch noch andere Fakten zu berücksichtigen.

Die Kennzahl „Herstellkosten/Rotorkreisfläche“ ist zugegebenermaßen etwas unanschaulich. Wir sind eher gewohnt, in „Kosten/Kilowatt“ zu denken. Dieser Parameter ist für regenerative Energiesysteme jedoch wenig aussagekräftig, da kein zwingender Zusammenhang zwischen der Nennleistung des elektrischen Generators und der tatsächlichen Leistungsfähigkeit, nämlich der Energielieferung des Systems besteht. Ein Vergleich der auf die Nennleistung bezogenen spezifischen Kosten ist nur dann sinnvoll, wenn die Jahres-Vollaststunden der verglichenen Systeme übereinstimmen. Unter diesen Vorbehalten lassen sich die derzeitigen Herstellkosten einer typischen Kleinanlage mit knapp 2000 DM/kW angeben.

Bei dem Versuch, den Stand der Windenergienutzung mit kleineren Anlagen zu charakterisieren, ist zunächst einmal festzustellen, daß heute kleine Windkraftanlagen mit Leistungen bis zu etwa 100 kW weltweit von zahlreichen Herstellern aus einer serienmäßigen Produktion angeboten werden. Diese Anlagen haben zumindest, was die Großserienprodukte betrifft, einen für die kommerzielle Nutzung ausreichenden technischen Reifegrad erreicht. In dieser Größenklasse ist die Windkraftnutzung deshalb weniger ein Forschungs- und Entwicklungsthema als vielmehr eine Frage der Anwendung.

Anwendungsfelder

Anwendung – und genau dort beginnen die Probleme auch bei kleinen Anlagen – heißt, daß die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen so sein müssen, daß tatsächlich ein wirtschaftlicher Betrieb für den Käufer möglich ist. Wer hierin allein eine Zuständigkeit der Industrie sieht, die über die Senkung der Preise die Voraussetzungen für einen Absatzmarkt zu schaffen habe, vereinfacht die Situation in unzulässiger Weise. Was die breitere Anwendung von kleinen Windkraftanlagen betrifft, so muß man heute auf mindestens drei Anwendungsfelder hinweisen, die für den Stand der Entwicklung prägend sind.

Der dezentrale verbrauchernahe Einsatz von kleinen Anlagen ist heute in Dänemark am weitesten fortgeschritten. Nahezu 1500 Windkraftanlagen mit einer durchschnittlichen Leistung um 50 kW sind dort in den letzten Jahren von privaten oder kommunalen Kunden gekauft worden. Was sind die Gründe für diesen Erfolg? Vier Faktoren sind zu nennen:

1. Das Angebot an zuverlässigen und relativ preiswerten Anlagen ist gut. Min-

destens fünf oder sechs Hersteller bieten Serienprodukte an.

2. In Dänemark sind zum Teil sehr phantasievolle Anwendungs- und Finanzierungsmodelle entwickelt worden. Zum Beispiel ist der gemeinsame Betrieb einer Anlage durch mehrere Verbraucher üblich.

3. Die Rückvergütungspreise für die Netzeinspeisung des nicht vom Anwender selbst genutzten Stromes sind relativ günstig.

4. Der Kauf einer Windkraftanlage und die Energielieferung werden nicht unerheblich subventioniert (die Subventionen liegen bei rund 30 Prozent).

Der zweite Anwendungsbereich, der wohl zur Zeit das spektakulärste Ereignis auf dem Gebiet der Windenergietechnik überhaupt ist, sind die Windfarmen in den USA. In Kalifornien stehen derzeit rund 10000 Anlagen mit einer Gesamtleistung von nahezu 1000 MW. Damit ist zum ersten Mal in der Geschichte der Windenergienutzung eine Größenordnung erreicht, die auch energiewirtschaftlich gesehen bedeutsam ist.

Windfarmen

Über die Voraussetzungen, die diese Entwicklung ermöglicht haben, kann man allerdings sehr geteilter Meinung sein. Viele sehen in diesen mit privatem Kapital errichteten Windfarmen nur ein Strohfeuer. Die privaten Investoren werden mit enormen Steuerabschreibungen, den sogenannten „tax credits“, angelockt (im Extremfall mehr als 50 Prozent). Die Versorgungsunternehmen zahlen für die eingespeiste Kilowattstunde umgerechnet bis zu 20 Pf/kWh, eine Zahl, die auf Dauer nach Ansicht nicht weniger Fachleute betriebswirtschaftlich nicht zu rechtfertigen ist. Dennoch, man mag von dieser sehr „amerikanischen“ Art der Windenergienutzung halten, was man will, in den letzten vier Jahren war dies der bei weitem bedeutendste Markt für Windkraftanlagen. Vor allem für die europäischen Hersteller. Etwa 25 Prozent der Anlagen stammen aus Europa, die meisten aus Dänemark. Dänische Firmen exportierten 1984 fast 3000 Anlagen mit einem Gesamtwert von 400 bis 500 Mill. DM. Etwa 3000 Arbeitsplätze in kleinen und mittleren Betrieben sind damit geschaffen worden.

Es gibt noch eine dritte Anwendung von kleinen Windkraftanlagen, die für die Zukunft vermehrte Bedeutung erlangen kann: An vielen Orten – vor allem in der Dritten Welt – wird elektrischer Strom noch mit Dieselmotoren erzeugt. Solche kleinen Inselnetze bieten außerordentlich günstige wirtschaftliche Voraussetzungen für den Einsatz von Windkraftanlagen. Die erzeugte Kilowattstunde ist mit dem Einsatz von leichtem Heizöl so teuer, daß sich eine zusätzliche Windkraftanlage als „Brennstoffsparer“ sehr schnell amortisieren kann. „Wind-Diesel“-Systeme werden deshalb mit Sicherheit für die Zukunft ein interessantes Betätigungs-

feld sein. — Mit Blick auf die Dritte Welt sollte man auch eine der ältesten Anwendungen der Windenergie nicht vergessen, nämlich das Wasserpumpen. Moderne Wind-Wasserpumpen, möglicherweise auch über den Umweg der Stromerzeugung, sind durchaus aussichtsreiche Anwendungsmöglichkeiten.

Meine bisherigen Bemerkungen über die Anwendung von kleinen Windkraftanlagen bezogen sich ausschließlich auf andere Länder. Das ist leider kein Zufall! Es ist offensichtlich, daß wir in der Bundesrepublik auf diesem Gebiet erheblichen Rückstand haben. Immerhin, positive Ansätze gibt es.

Einige Hersteller sind in der Lage, brauchbare Geräte anzubieten oder werden zumindest in kürzerer Zeit dazu imstande sein. In einem Fall ist bereits eine größere Serienfertigung angelaufen — allerdings vornehmlich für den Export in die USA. Das Bundesministerium für Forschung und Technologie fördert die Anwendung in einem Demonstrationsvorhaben „Einsatz kleiner Windkraftanlagen in der Bundesrepublik“. In diesem Rahmen werden 20 Anlagen in Norddeutschland aufgestellt. Auch das Land Schleswig-Holstein hat mit der Herausgabe der „Vorläufigen Richtlinien für die Auslegung, Aufstellung und das Betreiben von Windkraftanlagen“ einen wichtigen Schritt im Hinblick auf die Erleichterung der administrativen Prozeduren getan. Dennoch, auf diesem Gebiet liegt noch vieles vor uns. Ich denke zum Beispiel an die Schaffung der Voraussetzungen für die gemeinschaftliche Nutzung von Windkraftanlagen. Damit könnte die betriebswirtschaftliche Rentabilität der Windkraftanlagen mit Sicherheit gesteigert werden.

Was die vermehrte Aufstellung von Windkraftanlagen in unserem Land betrifft, so sollte man einen wichtigen Aspekt nicht vergessen: Ohne eine nennenswerte Anwendung von Windkraftanlagen im eigenen Land kann man auf Dauer auch keine Exportfolge erwarten. Dies gilt für die Windenergie-technik genau so wie für andere Bereiche. Dieser Gesichtspunkt sollte auch einer der Ausgangspunkte sein, über einen größeren Windpark in Schleswig-Holstein nachzudenken, auch wenn wir in unserem Land keine amerikanischen Windfarmen kopieren können und wollen. Ein gut geplanter Anlagenpark mit der richtigen Größe an einem geeigneten Standort würde der Windenergie-technik einen bedeutenden Schub geben können.

Systematisch forschen

Im Blick auf die technologische Forschung kann man sicher einige berechtigte Kritik an einzelnen Projekten unseres bisherigen Windenergieprogramms vorbringen. Eines wird man jedoch positiv hervorheben müssen: In der Bundesrepublik wurde in den letzten zehn Jahren die technologische Forschung auf dem Gebiet der Windenergie-technik intensiver und breiter als in manchen anderen Ländern betrieben, die uns in der Anwendung voraus sind. Dies betrifft sowohl die Erprobung unkonventioneller technischer Systeme wie auch einige wichtige Fachgebiete. Ich möchte beispielhaft die Regelungstechnik und die drehzahlvariablen Generatorsysteme für Windkraftanlagen nennen. Hier sind wir im internationalen Vergleich ohne Zweifel an der Spitze der Entwicklung.

Wer von der Windenergie einen wirk-

lich nennenswerten Beitrag für die Zukunft erwartet, muß sich darüber im Klaren sein, daß dieses Ziel im dicht besiedelten Mitteleuropa nur über relativ große Einheiten erreichbar ist. Wir sollten uns deshalb nicht von den Schwierigkeiten entmutigen lassen, die auf diesem Weg zu überwinden sind. Wir sollten uns aber auch nicht über die Länge dieses Weges täuschen. Die Entwicklung von großen Windkraftanlagen, die im Hinblick auf ihre Kosteneffektivität für die Energieversorgungsunternehmen akzeptabel sind, führt nicht mit einer einzigen technischen Entwurfsgeneration zum Ziel. Wer dieses Ziel wirklich erreichen will, braucht einen längeren Atem.

Aus dieser Einschätzung ergibt sich nahezu zwangsläufig ein zweites Ziel: Weil die kommerzielle Anwendung von großen Windkraftanlagen vorläufig noch ein Fernziel ist, im Einzelfall aber durchaus sinnvoll und nützlich sein kann, sollte die vermehrte Anwendung von kleinen Anlagen unser Nahziel sein. Erfahrungsgemäß lassen sich auch die technologischen Probleme von „unten nach oben“ besser lösen als umgekehrt. Auch aus diesem Grunde führt der Weg der Windenergie-technik über die kleineren Systeme zu weiter gesteckten Zielen.

Die Ergebnisse der technologischen Forschung müssen in Zukunft wesentlich stärker auf eine nutzbringende Anwendung konzentriert werden. Bei allem Respekt vor innovativem Forscher- und Erfindergeist, die systematische Forschungsarbeit mit Blick auf die heute einsetzbaren Systeme darf dadurch nicht vernachlässigt werden. Nach meiner Einschätzung klafft gerade in der Windenergie-technik bei uns eine zu große Lücke zwischen innovativen und praktisch einsetzbaren Systemen.

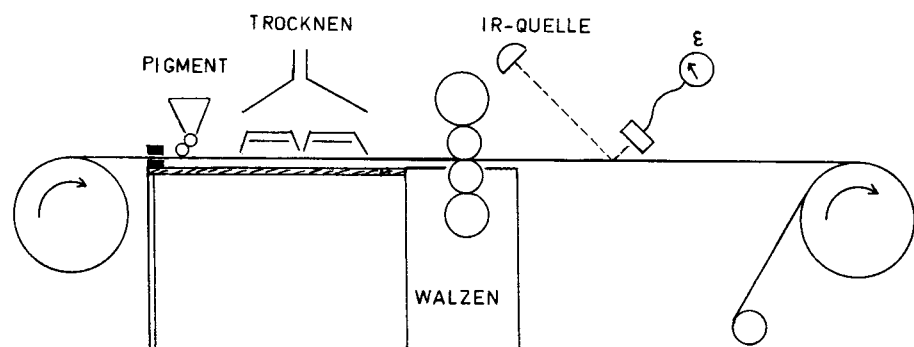
Neuartige selektive Beschichtung auf Pigmentbasis

Selektive Absorberschichten bieten die Möglichkeit, die Wärmeverluste von Sonnenkollektoren wirksam zu vermindern. Sie reduzieren die Wärmeabstrahlung des heißen Absorbers in Richtung Glasscheibe. Bei gewöhnlichen Flachkollektoren treten durch Wärmeleitung und Konvektion parallel zur Wärmestrahlung auch andere Verlustströme auf. Da aber die Strahlungsverluste eines nicht-selektiven Absorbers meist dominieren, ist mit selektiven Schichten trotzdem viel zu erreichen. In der Praxis lohnt es sich, die Wärmeabstrahlung auf etwa ein Drittel des ursprünglichen Wertes zu reduzieren, was eine Emissivität von rund 0,3 bedeutet. (Erläutert vom Verfasser in „Solar Energy“ 19 [1977], Seite 263 bis 270). Solche Werte sind mit farbähnlichen Schichten gut erreichbar.

Selektive Farben sind eine interessante Alternative zu den bekannten chemischen und galvanischen Beschichtungsverfahren. Zu ihrer Herstellung sind aber die in der herkömmlichen Lacktechnik verwendeten Materialien gänzlich ungeeignet. In der früheren Literatur beschriebene Versuche fielen

auch durchwegs negativ aus. Vor einigen Jahren fanden wir jedoch Metalloxide, die sich als selektive Pigmente gut eignen und zudem sehr hitzefest sind. Zur Verwendung als Bindemittel lassen sich dagegen kaum geeignete Stoffe finden, wenn eine gute Stabilität auch noch bei 150° oder sogar 200°C verlangt wird.

Aus diesem Grunde suchten wir Verfahren, das Pigment ohne Bindemittel an die Metalloberfläche zu binden. Das gelang schließlich durch Kompaktieren in einem Walzwerk (Deutsches Patent Nr. 2656490). Das Fehlen eines Bindemittels ermöglicht eine niedrigere Emissivität und höhere Hitzebeständigkeit, bietet aber auch Gewähr dafür, daß



Funktionsschema zur Beschichtungsanlage