

## 2 Kenntnisstand

In Kapitel 2 werden grundlegende Begrifflichkeiten definiert, die Bedeutung der Arbeit dargestellt, vorhandene Ansätze zur Bewertung des Anfahrvorgangs diskutiert und aufgezeigt, worin der Forschungsbedarf und die Berechtigung der Arbeit liegen.

### 2.1 An- und Abfahrvorgang eines Kraftwerks

Unter dem „Anfahren“ wird der Vorgang verstanden, ein Kraftwerk aus dem Stillstand (z. B. nach einer Revision oder einem Wochenend- oder Nachtstillstand) wieder in Betrieb zu nehmen. Das Anfahren umfasst damit das systematische Zuschalten der Kraftwerkskomponenten bis zum Erreichen der Mindestlast im Beharrungspunkt<sup>10</sup> und wird auch als Start bezeichnet. Die Dauer eines Anfahrvorgangs variiert je nach Kraftwerkstyp und vorausgegangener Stillstandsdauer zwischen wenigen Minuten (Spitzenlastkraftwerke, z. B. auf Gasturbinenbasis) und mehreren Tagen (Grundlastkraftwerke, z. B. Kernkraftwerke). Bei den in der Arbeit betrachteten Steinkohlekraftwerken dauert eine Anfahrt im Mittel zwischen gut einer Stunde bei einem Heißstart und knapp drei Stunden bei einem Kaltstart<sup>11</sup>.

Wann eine Anfahrt beginnt und wann diese endet, wird sowohl in der Praxis von Standort zu Standort als auch in der Literatur unterschiedlich definiert.<sup>12</sup> Die in der Arbeit verwendeten Definitionen des An- und Abfahrvorgangs orientieren sich an der VGB-Richtlinie VGB-R 123 C/2.10 „An- und Abfahrverluste bei Blockanlagen von konventionellen thermischen Kraftwerken“ [122]. Nach der genannten Richtlinie beginnt eine *Anfahrt* mit der Zuschaltung des ersten Hilfsantriebs (meist die Hauptkühlwasser- oder Kondensatpumpen) bzw. mit der ersten Hilfsdampfeinspeisung, die für das Anwärmen bestimmter anfahrrelevanter Systeme notwendig ist. Das *Anfahrende* ist nach der VGB-Richtlinie bei Erreichen der Mindestlast im Beharrungspunkt erreicht. Die Mindestlast definiert sich über den Lastpunkt, in dem die Anlage im Dauerbetrieb sicher und stabil gemäß Betriebshandbuch betrieben werden kann. Der Beharrungszustand ist erreicht, wenn die nach Erreichen der Mindestlast noch nicht vollständig erwärmten Bauteile vollständig wiederaufgeheizt sind. Der Beharrungszustand

---

<sup>10</sup> Auf das Anfahrende und auf vorhandene Festlegungen in diesem Zusammenhang wird im Folgenden (Kapitel 2.1) noch näher eingegangen.

<sup>11</sup> Auf die Unterscheidung unterschiedlicher Starts geht die Arbeit im Folgenden noch näher ein.

<sup>12</sup> Nach [125] beginnt der Anfahrvorgang beispielsweise mit dem Zünden des ersten Gasbrenners und endet mit dem Schließen der Hochdruckumleitstation (HDU). In der Betriebspraxis wird die Synchronisation oftmals als das Ende des Anfahrvorgangs definiert.

wird, Erfahrungswerten zufolge, erst drei bis sechs Stunden nach der Mindestlast erreicht [122]. Zur korrekten Ermittlung wäre nach Erreichen der Mindestlast über rund drei bis sechs Stunden eine konstante Lastfahrt notwendig. Diese lange Verweilzeit widerspricht jedoch dem tatsächlichen Einsatz in der Praxis.<sup>13</sup> Aus diesem Grund wird in der Praxis das Ende einer Anfahrt meist über das Erreichen der Mindestlast definiert. Dieser Definition wird sich in der Arbeit angeschlossen. Der *Abfahrvorgang* eines Blocks beginnt mit der Einleitung des betrieblichen Abfahrprogramms nach Verlassen der Mindestlast. Er endet mit dem Abschalten des letzten großen Hilfsantriebs, in der Regel der Hauptkühlwasserpumpen [122].

Die Anfahrt eines Blocks wird typischerweise in Heiß-, Warm- und Kaltstart unterschieden. Die Einteilung erfolgt meist nach der Stillstandszeit der Anlage. Als Stillstandszeit ist der Zeitraum zwischen Abfahrende und Anfahrbeginn definiert [122]. Sie ist ein Maß für den Abkühlungszustand des Blocks. Abweichend von der Stillstandszeit werden in der Literatur (und auch in der Praxis) aber auch andere Kriterien<sup>14</sup> für die Unterscheidung der Anfahrten verwendet [39]. Aus diesem Grund ist die Unterteilungssystematik der Starts daher nicht immer einheitlich. Basierend auf der Stillstandszeit der Anlage werden die Anfahrten oftmals nach der in Tabelle 2.1 dargestellten Unterteilung in Heiß-, Warm- und Kaltstarts unterschieden [39]. Diese entspricht der verwendeten Klassifizierung von Heiß-, Warm- und Kaltstarts im betrachteten Unternehmen und den Herstellerangaben eines namhaften Original Equipment Manufacturer (OEM) für ein aktuell vom betrachteten Unternehmen errichtetes Neubaukraftwerk [79]. Die Arbeit schließt sich dieser Unterteilung von Anfahrten in Heiß-, Warm- und Kaltstarts an.

Tabelle 2.1: Unterteilung der Anfahrten nach der Stillstandszeit eines Blocks [39].

Art der Anfahrt	Stillstandszeit $t_{SZ}$
Heißstart	< 8 Stunden
Warmstart	8 – 48 Stunden
Kaltstart	> 48 Stunden

---

<sup>13</sup> Für weitergehende Informationen wird auf die entsprechende VGB-Richtlinie VGB-R 123 C/2.10 [122] verwiesen.

<sup>14</sup> Die Stillstandszeit des Blocks ist, wie dargestellt, nur ein möglicher Parameter als Maß für den Auskühlungszustand [122]. Alternativ können beispielsweise Gehäuse- oder Sammlerwandtemperaturen verwendet werden. In [26] werden Heiß-, Warm- und Kaltstarts über das Verhältnis von Bauteiltemperatur zu Nenntemperatur und über den Druck im Kessel unterschieden. Bei einem Kaltstart wird oftmals davon ausgegangen, dass der Block auf Umgebungstemperatur abgekühlt ist [26], [52].

Ein „Start“ im Sinne der Arbeit beinhaltet einen kompletten An- und Abfahrzyklus<sup>15</sup>, auch wenn hierauf nicht immer explizit hingewiesen wird. Ist in der Arbeit von „anfahrbedingten“ Effekten die Rede, so sind damit auch die abfahrbedingten Effekte mitinbegriffen. Bezieht sich die Arbeit auf „betriebsbedingte“ Effekte, so sind damit die zugrunde liegenden Betriebsstunden des Blocks und nicht der „Betrieb“ im Allgemeinen (Betriebsstunden und Anfahrten) gemeint. Unter den Betriebsstunden eines Blocks wird die Betriebszeit analog [118] verstanden. Die Betriebszeit ist die Zeitspanne, in der die Anlage Energie umwandelt oder überträgt [118]. In der Arbeit wird nicht zwischen Betriebsstunden in unterschiedlichen Lastzuständen (Teillast, Vorlast etc.) unterschieden, ebenso wenig werden Lastwechsel während des Betriebs (z. B. Lastabsenkungen oder die Regelenenergiebereitstellung) untersucht.

## 2.2 Anfahrbedingte Kosten

Die Kosten eines Anfahrvorgangs setzen sich aus drei grundlegenden Komponenten zusammen: dem Anfahrerenergieverbrauch, den anfahrbedingten Instandhaltungskosten (IH-Kosten) und sonstigen anfahrbedingten Kosten [25]. Auf den Anfahrerenergieverbrauch und auf sonstige anfahrbedingte Kosten wird der Vollständigkeit halber im Folgenden kurz eingegangen. Jedoch werden diese Effekte in der Arbeit explizit nicht näher betrachtet. Fokus der Arbeit sind die anfahrbedingten IH-Kosten.

*Anfahrerenergieverbrauch:* Unter Anfahrerenergieverbrauch wird der energetische Verlust in Form von Brennstoff und sonstiger Hilfsenergie durch das An- und Abfahren mit Berücksichtigung der in dieser Zeit erzeugten elektrischen (el.) Energie verstanden [122].<sup>16</sup> Der Anfahrerenergieverbrauch und die damit verbundenen Kosten sind hinreichend bekannt und nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

*Anfahrbedingte Instandhaltungskosten:* Ein Kraftwerk unterliegt beim An- und Abfahrvorgang einer Belastung, die sich mittel- und langfristig in IH-Kosten niederschlägt [13], [96], [97], [62], [100], [1], [37], [47], [130]. Es stellt sich die Frage, wie hoch der Anteil der IH-Kosten ist, der durch die Anfahrten verursacht wird. Dieser anfahrbedingte IH-Kostenanteil soll – wie angesprochen – in der Arbeit näher untersucht und bestimmt werden.

---

<sup>15</sup> Ein „Start“ beinhaltet damit das Anfahren der Anlage, gefolgt von einem Wiederabfahren.

<sup>16</sup> Für weiterführende Informationen wird auf die VGB-Richtlinie „An- und Abfahrverluste bei Blockanlagen von konventionellen thermischen Kraftwerken“ [122] verwiesen, in der deren Bestimmung ausführlich erläutert wird.

*Sonstige anfahrbedingte Kosten:* Zusätzlich zu den bereits angesprochenen Kosten für den Anfahrnergieverbrauch und die anfahrbedingten Instandhaltungsmaßnahmen kommt es durch den Anfahrvorgang zu weiteren Effekten, die monetär bewertet und dem Anfahrvorgang zugerechnet werden können. Beispiele hierfür sind der Lebensdauerverbrauch der Anlage<sup>17</sup>, die langfristige Wirkungsgradverschlechterung aufgrund von Abnutzungserscheinungen anfahrbeschädigter Komponenten wie beispielsweise verschlissener Dichtungen oder geschädigter Wärmetauscher [68], [55] und die Kosten einer anfahrbedingten Nichtverfügbarkeit.<sup>18</sup>

### **2.3 Bedeutung der monetären Bewertung des Anfahrvorgangs**

Im Folgenden wird aufgezeigt, warum die monetäre Bewertung der Anfahrten eines Blocks von großer Bedeutung sowohl für Energieversorgungsunternehmen (EVUs) im liberalisierten Markt als auch für volkswirtschaftliche Fragestellungen ist.

#### **2.3.1 Einfluss des Anfahrvorgangs auf die Instandhaltungskosten**

Der Anfahrvorgang stellt eine Belastung des Kraftwerks dar, die zu IH-Kosten führt [1], [13], [37], [47], [52], [62], [96], [97], [100], [130]. Wie im Folgenden noch aufgezeigt, ist die Instandhaltung von strategischer Bedeutung für EVUs im liberalisierten Energiemarkt. Instandhaltung (IH) ist nach DIN 31051:2003-06 [16] wie folgt definiert:

*Instandhaltung ist die Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie der Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.*

Mit anderen Worten wird unter IH die Aufrechterhaltung der Betriebsfähigkeit eines technischen Erzeugnisses verstanden, wobei IH in Inspektion, Wartung und Instandsetzung unterteilt werden kann [68] (vgl. Abbildung 2.1). Die IH inkl. der zugrunde liegenden IH-Strategie<sup>19</sup> und der mit den IH-Maßnahmen verbundenen Kosten sind von herausragender Bedeutung für einen Kraftwerksbetreiber. Ein Grund für die besondere Bedeutung der Instandhaltungskosten ( $K_M$ ) für EVUs im liberalisierten Markt ergibt sich aus der Tatsache, dass

---

<sup>17</sup> Dass ein Lebensdauerverbrauch nicht zwangsläufig zu entscheidungsrelevanten Kosten führt, wird in Kapitel 4.2 in der Bewertungsmethodik aufgezeigt und diskutiert.

<sup>18</sup> Für weiterführende Informationen in Bezug auf die Nichtverfügbarkeit, deren Berechnung und Unterscheidung wird auf die umfangreiche Fachliteratur verwiesen [66], [117], [118], [126], [127]. Auf die anfahrbedingte Nichtverfügbarkeit wird im Ausblick in Kapitel 8 eingegangen.

<sup>19</sup> Auf die unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien wird nicht weiter eingegangen, es wird jedoch auf die umfangreiche vorhandene Fachliteratur hingewiesen [41], [42], [68], [93], [107].

die IH-Kosten mit rund 20 – 30 %<sup>20</sup> [40], [69] einen wesentlichen Kostenbestandteil der Gesamterzeugungskosten darstellen [69]. Die Betriebskosten eines Kraftwerks werden oftmals in folgende drei wesentliche Kostenarten unterteilt: Brennstoff- und Betriebsmittelkosten, Kapitalkosten und die Kosten für den Betrieb und die Instandhaltung.<sup>21</sup> Für den Betrieb und die Instandhaltung hat sich die Bezeichnung „Operation und Maintenance“ (O&M) eingebürgert. Die IH-Kosten sind ein Teil der O&M-Kosten.

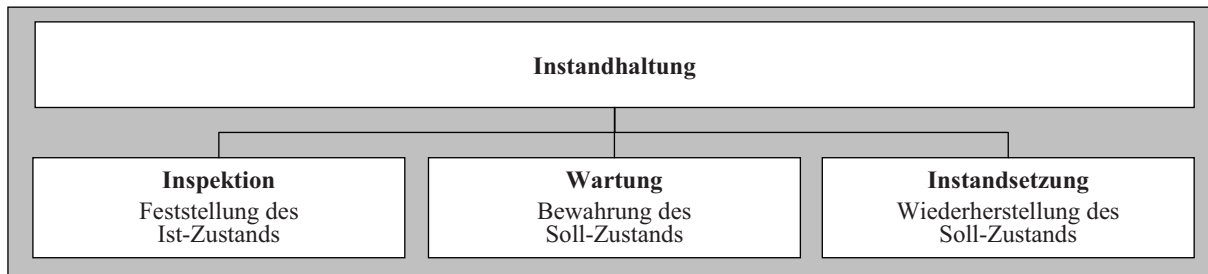


Abbildung 2.1: Unterteilung von Instandhaltung in Inspektion, Wartung und Instandsetzung.

In Kapitel 4 wird im Rahmen eines allgemeingültigen Referenzmodells auf die Unterteilungssystematik der IH-Kosten noch näher eingegangen. Ein weiterer Grund für die besondere Bedeutung der IH-Kosten ist die Tatsache, dass sie den Teil der Betriebskosten darstellen, der aktiv beeinflusst und, verglichen mit den Kapital- und Brennstoffkosten, vom Unternehmen am ehesten gesteuert werden kann [73]. Damit stellen die Instandhaltungsstrategie, die Kenntnisse über Wirkungszusammenhänge im Bereich der Schädigung von Bauteilen und die richtige Beurteilung des Lebensdauer verbrauchs der Anlage zentrale Kernkompetenz eines Kraftwerksbetreibers mit strategischer Bedeutung dar. Neben den Brennstoffpreisen, die von der Brennstoffart und dem Kraftwerksstandort abhängen, werden die Instandhaltungskosten zukünftig eine entscheidende Rolle spielen [68]. Die Beschreibung von Kraftwerksbetreibern als „Instandhaltungsbetriebe mit Stromproduktion“ [40] machen in überspitzter Form die Bedeutung der Instandhaltung für moderne EVUs deutlich. In der Arbeit wird eine Methodik entwickelt, mit welcher der Einfluss des Einsatzes und insbesondere der Anfahrten auf die IH-Kosten monetär bewertet werden kann (s. Kapitel 4).

<sup>20</sup> Je nach Einsatz, aktuellen Energiekosten und vorliegender Kraftwerkscharakteristik können die Werte hiervon abweichen. Der Anteil der Brennstoff- bzw. Instandhaltungskosten ist zudem vom Einsatz des Blocks abhängig.

<sup>21</sup> Auf die Brennstoff- und Betriebsmittelkosten sowie die Kapitalkosten wird in der Arbeit nicht weiter eingegangen. Verwiesen wird auf die umfangreich vorhandene Fachliteratur [125] [68], [95], [108] [69].

### **2.3.2 Einfluss der Anfahrkosten auf den Einsatz der Blöcke**

Im liberalisierten Energiemarkt stehen Energieversorger vor der Frage, wann und in welchem Umfang die eigenen Kraftwerke eingesetzt werden sollen und wann ein Fremdbezug wirtschaftlich sinnvoller ist. Vor diesem Hintergrund ist die Kenntnis der „tatsächlichen“ Kosten des Anlageneinsatzes für die Einsatzsteuerung und den konzernweiten, optimalen Einsatz der Kraftwerke von entscheidender Bedeutung. Teil dieser Kosten sind, wie im Folgenden noch näher dargestellt, die Anfahrkosten.

*Kurzfristige Einsatzoptimierung:* Unter den heutigen Marktbedingungen haben die Anfahrkosten bei der Einsatzoptimierung Einfluss darauf, ob, wann und in welchem Umfang ein Block eingesetzt wird. Liegen keine restriktiven Randbedingungen<sup>22</sup> vor, so haben die Anfahrkosten Einfluss auf die Entscheidung, ob ein Block in einer Periode mit geringen Strompreisen (typischerweise nachts) auf Mindestlast weiterbetrieben oder abgestellt wird. Damit beeinflusst die Höhe der Anfahrkosten über die Einsatzoptimierung direkt das Einsatzregime eines Blocks. Qualitativ ist dies in Anhang G in Abbildung G.1 dargestellt. Sind die Anfahrkosten zu gering angesetzt, werden die realen Kosten des Anlagenbetriebs nicht gedeckt. Werden sie zu hoch angesetzt, so ist der Block in Zeiten außer Betrieb, in denen er eigentlich einen positiven Deckungsbeitrag erwirtschaften könnte.

*Langfristige Einsatzoptimierung und Asset Managements bestehender Altanlagen:* Bei einer langfristigen Betrachtung gewinnt die Bewertung des Anfahrvorgangs beim Asset Management bestehender Anlagen zunehmend an Bedeutung. Hintergrund ist die fortschreitende Alterung der Bestandsanlagen und das Bestreben der Anlagenbetreiber, die Belastung der Anlagen und deren Lebensdauer auch aus technischer Sicht möglichst genau zu steuern. Auch hierbei sind die in der Arbeit entwickelten Ergebnisse von Bedeutung: Es wird eine Methodik aufgezeigt, wie aus dem Einsatz eines Blocks dessen instandhaltungskostenrelevante Belastung abgeleitet werden kann.

### **2.3.3 Einfluss der Anfahrkosten auf die Bewertung der Windenergieeinspeisung**

Ein weiterer Aspekt, der eine monetäre Bewertung des Anfahrvorgangs notwendig macht, ist die zunehmend an Bedeutung gewinnende Integration fluktuierender und stochastischer Windenergieeinspeisung. Bekannt ist, dass die Integration volatiler Energiemengen zuneh-

---

<sup>22</sup> Restriktive Randbedingungen sind beispielsweise Fernwärmelieferverpflichtungen oder ein Schaden, dessen Reparatur das (nächtliche) Abstellen des Blocks notwendig macht.

mend Auswirkungen auf den konventionellen Kraftwerkspark hat [99], [48]. Sie erfordert u. a. die Vorhaltung positiver wie negativer Regelleistung und macht eine höhere Flexibilität des (vorhandenen, konventionellen) Stromerzeugungssystems notwendig [13]. Zum einen kommt es durch den Ausbau der Windenergie zu einer Verschiebung der Lastdauerlinie der konventionellen Anlagen [13], [47]. Die Auslastung verringert sich und die Blöcke werden mehr Zeit auf Teillast betrieben. Zum anderen führt die steigende Windenergieeinspeisung zu häufigeren Lastwechseln und zu mehr An- und Abfahrten der konventionellen Kraftwerksblöcke [88], [80], [130]. Die häufigeren An- und Abfahrvorgänge führen zu zusätzlichen „Wartungs- und Verschleißkosten“ [47], [130], [52]. Besonders betroffen von der zunehmenden Windenergieeinspeisung sind Steinkohleblöcke, da durch Windenergieeinspeisung vornehmlich Steinkohle-, mitunter auch Braunkohlestrom substituiert wird [130].

Die Kosten für den spezifisch höheren Brennstoffbedarf von Anlagen im Teillastbereich sind bekannt und in vielen Publikationen ausführlich behandelt [80], [88], [47], [48], [130]. Die monetäre Bewertung der anfahrbedingten erhöhten Wartungs- und Instandhaltungsaufwendungen hingegen ist „noch nicht bekannt“ und wird in „Grobabschätzungen“ vorgenommen [130].<sup>23</sup> Andere Literaturquellen geben die „Abnutzungskosten bei einem Kaltstart“ mit 4,8 Euro je MW an [13]. Die vorliegenden Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass hierdurch nur ein Teil der variablen anfahrbedingten IH-Kosten berücksichtigt und die tatsächlichen Kosten des Anfahrvorgangs um den Faktor 5 – 10 unterschätzt werden.

Die Bewertung eines An- und Abfahrzyklus unter Miteinbeziehung der tatsächlich verursachten anfahrbedingten IH-Kosten ist damit sowohl aus Sicht eines Anlagenbetreibers als auch aus volkswirtschaftlicher Sicht von Interesse. Fokus eines Anlagenbetreibers sind die zu erwartenden IH-Kosten und die Abschätzung der Belastung der betriebenen Anlagen sowie deren Einsatzoptimierung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Bei einer volkswirtschaftlichen Betrachtung geht es u. a. darum, ob und wenn ja zu welchen (tatsächlichen) Kosten die Netzintegration von Windenergie erfolgen kann. Zur Beantwortung beider Fragestellungen sind die Ergebnisse der Arbeit damit von Bedeutung.

---

<sup>23</sup> In Kapitel 2.5 wird aufgezeigt, dass es aktuell keine schlüssige, nachvollziehbare Methodik zur Bestimmung der systemübergreifenden blockweiten Anfahrkosten bzw. zur Überprüfung der publizierten Abschätzungen gibt [8].