

1 Einleitung

Die Generalversammlung der Vereinten Nationen hat 2015 eine Agenda verabschiedet, welche einen Handlungsplan zur nachhaltigen Veränderung der Welt bis 2030 festlegt [UNGA15]. Diesem Plan folgend ist von der Europäischen Kommission unter dem Titel „European Green Deal“ ein ehrgeiziges Klimaprogramm vorgestellt worden. Dieses hat nicht nur zum Ziel Europa bis 2050 in den ersten klimaneutralen Kontinent zu verwandeln, sondern soll darüber hinaus die europäische Wirtschaft im globalen Wettbewerb zu einer Vorreiterrolle für die Nachhaltigkeit führen [EUKO19a; EUKO19b; DUBO21, S. 20]. Das Thema Nachhaltigkeit gewinnt daher in den verschiedensten Bereichen zunehmend an Bedeutung und resultiert in einem wirtschaftlichen Umdenken. *„Das mit den vergangen industriellen Revolutionen eng verknüpfte kapital- und ressourcenintensive Produktivitätsdenken differenziert sich zunehmend vom Zukunftsbild einer ökologisch bewussten denkenden Gesellschaft“* [BERG21, S. 122]. *„Die Welt befindet sich an einem Wendepunkt hin zu einer ressourcenschonenden Wirtschaft“*, [DUBO21, S. 20]. Vor diesem Hintergrund gilt es im Bereich der Fertigungsverfahren, zukünftig den steigenden ökologischen, sozialen und ökonomischen Anforderungen gerecht zu werden.

Betrachtet man den Bereich der Zerspantechnologie, stellt man fest: Bedeutende Nachhaltigkeitsprobleme sind die unbedachte und ausgiebige Verwendung von Kühlschmierstoffen (KSS) sowie die damit verbundenen Kosten und Energiebedarfe [JAWA16, S. 714]. KSS stellen eine Gefährdung für die damit umgehenden Menschen und die Umwelt dar [KLOC18, S. 262; KLOC08, S. 249; DGUV11, S. 7]. Der intensive Kontakt der Produktionsmitarbeiter mit KSS kann unter anderem zu Haut-, Atemwegs- und Krebserkrankungen führen [BYRN93, S. 473]. Die umfangreiche Verwendung von KSS führt zu beträchtlichen Abfallmengen und, um die Verschmutzung von Gewässern zu vermeiden, ist ein verantwortungsvoller Umgang mit gebrauchten Flüssigkeiten erforderlich [ADLE06, S. 25]. Darüber hinaus sind spanende Werkzeugmaschinen für 1 bis 3 % (200 – 700 TWh) des globalen elektrischen Energiebedarfs verantwortlich [DENK20, S. 646]. Ein entscheidender Anteil des Energiebedarfs spanender Werkzeugmaschinen von durchschnittlich ca. 30 % muss für die KSS-Zufuhr aufgewendet werden [DENK20, S. 650]. Trotzdem ist der Einsatz von wassermischbaren und nicht wassermischbaren KSS bis heute die gängige industrielle Praxis in vielen Zerspanprozessen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für eine produktive, prozesssichere und international wettbewerbsfähige Zerspanung eine effiziente Kühlung, Schmierung und ein sicherer Spanabtransport unumgänglich sind. Im Besonderen besitzt diese Aussage bei der Zerspanung von hochlegierten Stählen, Nickelbasis- und Titanlegierungen Gültigkeit. Bei der Zerspanung dieser schwer zerspanbaren Werkstoffe tritt eine hohe thermo-mechanische Werkzeugbelastung auf. Diese resultiert in starkem Werkzeugverschleiß sowie geringen anwendbaren Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeiten. Vor dem Hintergrund stetig zunehmender Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Produktionsprozessen muss zukünftig die Verwendung alternativer Kühlschmierstrategien stärker in Betracht gezogen werden.

Eine Kühlschmierstrategie ohne bzw. mit deutlich reduziertem Einsatz konventioneller Kühlschmierstoffe ist die kryogene Kühlung bzw. die kryogene Kühlschmierung. Bei der kryogenen Kühlung wird nur ein kryogenes Kühlmedium zugeführt, während bei der kryogenen Kühlschmierung ein kryogenes Kühlmedium und ein Schmiermedium zugeführt werden. Insbesondere für Werkstoffe, wie z. B. Titanlegierungen, bei deren Zerspanung aufgrund ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit thermisch bedingte Verschleißmechanismen eine dominantere Rolle spielen als die mechanischen, stellt die kryogene Kühlung einer Alternative dar, um die in der Zerspanzone generierte Wärme abzuführen [MSAO15, S. 569]. Bei der kryogenen Kühlung bzw. kryogenen Kühlschmierung werden verflüssigte Gase wahlweise in Kombination mit einer Minimalmengenschmierung (MMS) für die Kühlung und Schmierung eingesetzt. Die aufgrund ihrer guten Verfügbarkeit und verhältnismäßig sicheren Handhabung am häufigsten verwendeten tiefkalten Medien für die kryogene Kühlschmierung sind Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Stickstoff (N_2) [KLOC18, S. 277; KRAE15, S. 1; MSAO15, S. 569]. In den vergangenen 70 Jahren wurden die Potenziale kryogener Kühlschmierstrategien im Vergleich zu konventionellen Kühlschmierstrategien erarbeitet. Zu den wichtigsten gehören eine Steigerung der Produktivität, kühlsmierstoffbezogene Kosteneinsparungen, eine verbesserte Bauteilqualität sowie eine reduzierte Umweltbelastung und verringerte Gefährdung der Mitarbeiter durch die Vermeidung des Kontaktes mit KSS [KRAE15, S. 1; PUSA10a, S. 26]. Trotz dieser umfangreichen Untersuchungen und vielversprechender Potenziale ist eine weitreichende industrielle Anwendung der Technologie der kryogenen Kühlschmierung bisher nicht festzustellen. Dies ist sowohl auf ungeklärte technologische, wissenschaftliche als auch auf wirtschaftliche Fragestellungen zurückzuführen. Vor allem beim Fräsen schwer zerspanbarer Werkstoffe sind die Mechanismen, welche den mit dem Einsatz der kryogenen Kühlschmierung vielfach verbundenen Leistungssteigerungen zugrunde liegen, nicht vollständig geklärt. Grundlegende Kenntnisse über die Wirkmechanismen sind jedoch zwingend notwendig, um verstehen zu können, warum, bei welchen Bearbeitungsaufgaben und unter welchen Bedingungen die Technologie der kryogenen Kühlschmierung zu technologischen, ökonomischen und ökologischen Vorteilen im Vergleich zur konventionellen Kühlschmierung führt.

Um einen wesentlichen Beitrag zur Beantwortung der genannten Frage- und Problemstellungen zu leisten, ist es die Zielsetzung dieser Arbeit, wissenschaftliche Erkenntnisse über die Wirkmechanismen sowie Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der kryogenen Kühlschmierung beim Fräsen zu erarbeiten und die Technologie im Vergleich zu konventionellen Kühlschmierstrategien ökonomisch und ökologisch zu bewerten.

Introduction

In 2015, the United Nations General Assembly adopted an agenda that defines a plan of action for sustainable development of our world by 2030 [UNGA15]. Following this plan, an ambitious climate program has been introduced by the European Commission under the title “European Green Deal”. This program has not only the objective to turn Europe into the first climate-neutral continent by 2050, but also intends the European economy to become a lead role regarding sustainability in global competition [EUKO19a; EUKO19b; DUBO21, p. 20]. The topic of sustainability is increasing in importance in a wide variety of areas and is leading to a change in economic thinking. The capital- and resource-intensive productivity thinking closely linked to the past industrial revolutions is increasingly differentiating itself from the future image of an ecologically conscious thinking society [BERG21, p. 122]. The world is at a turning point towards a resource-efficient economy [DUBO21, p. 20]. Against this background, it is essential in the area of manufacturing processes to meet the increasing ecological, social and economic requirements in the future.

Considering the area of machining technology, it becomes apparent that: *“The indiscriminate and abundant use of cutting fluids in manufacturing processes and the associated costs and energy consumption has been a major sustainability concern”*, [JAWA16, p. 714]. Furthermore, cutting fluid (CF) represents a not inconsiderable hazard for the people handling it and for the environment [KLOC18, p. 262; KLOC08, p. 249; DGUV11, p. 7]. *“The intensive contact of the production worker to cutting fluid can lead to skin and respiratory diseases and there is increased danger of cancer”*, [BYRN93, p. 473]. *“Extensive use of cutting fluids in machining operations leads to a sizeable waste stream. Responsible handling of used/waste fluid is needed to avoid the contamination of lakes, rivers and groundwater”*, [ADLE06, p. 25]. Furthermore, machine tools are responsible for 1 to 3% (200 to 700 TWh) of the global electrical energy demand [DENK20, p. 646]. A decisive share of the energy demand of a machine tool of approximately 30% on average must be spent on cutting fluid supply [DENK20, p. 650]. Nevertheless, the use of water-miscible and non-water-miscible cutting fluids is still common industrial practice in many machining processes. This is attributable to the fact that efficient cooling and lubrication are essential to achieve productive and internationally competitive processes. This applies in particular to the machining of high-alloyed steel, titanium alloys and nickel-based alloys. During machining of these materials a high thermomechanical tool load occurs which results in high tool wear as well as in low applicable cutting speed and feed rate. Regarding continuously increasing sustainability requirements of manufacturing processes, an ecological use of CF will become a rising influence on the economy of the cutting processes.

An alternative cooling and lubrication strategy without or with only little use of conventional CF is represented by a combined cryogenic cooling and lubrication. Especially for materials such as titanium alloys, where thermal wear mechanisms play a more dominant role than mechanical ones due to their low thermal conductivity, cryogenic cooling is an alternative to dissipate the heat generated in the cutting zone

[MSAO15, p. 569]. In this strategy, liquefied gases optionally in combination with minimum quantity lubrication (MQL) are used for cooling and lubrication. Because of their good availability and relatively simple handling, the most used liquefied gases for cryogenic cooling and lubrication are carbon dioxide (CO₂) and nitrogen (N₂) [KLOC18, p. 277; KRAE15, p. 1; MSAO15, p. 469]. Over the past 70 years the potential of cryogenic cooling and lubrication strategies compared to conventional cooling and lubrication strategies have been evaluated. The most important of these are an increase in productivity, CF related cost savings, improved component quality, as well as reduced environmental impact and reduced risk to employees by avoiding contact with CF [KRAE15, p. 1; PUSA10a, p. 26]. Despite the extensive investigations and promising potentials, a widespread industrial application of the technology of cryogenic cooling and lubrication has not yet been established. This is due to technological, scientific as well as economic issues. Especially in case of milling of difficult-to-machine materials the mechanisms underlying the performance increases often associated with the use of cryogenic cooling and lubrication are not completely understood. However, this fundamental knowledge is necessary to understand why, for which machining tasks and under which conditions the technology of cryogenic cooling and lubrication leads to technological, economic and ecological advantages compared to conventional cooling and lubrication.

To provide a major contribution to answering the above-mentioned questions and problems, the objective and motivation of this work was to gain fundamental scientific knowledge of combined cryogenic cooling and lubrication in milling and to evaluate the technology economically and ecologically in comparison to conventional cooling and lubrication strategies.